Adrian Baraboi
Maricel Avram

Ioan Ciutea
Eugen Hnatiuc

TEHNICI MODERNE ÎN COMUTAȚIA DE PUTERE

A92

A. BARABOI I. CIUTEA
M. ADAM E. HNATIUC

TEHNICI MODERNE ÎN COMUTAȚIA DE PUTERE

EDITURA A 92
IAȘI, 1996

Adrian Baraboi[1]

Este absolvent din 1971 al Facultății de Electrotehnică din Iași. În anul 1981 obține titlul de doctor inginer. Din 1992 este profesor la Catedra de Energetică a facultății absolvite. Lucrările științifice publicate, brevetele de invenție și colaborările cu producția reflectă preocupări în următoarele domenii: analiza și simularea solicitărilor echipamentului electric, a proceselor și circuitelor neliniare, tehnici de comutație și protecție, compatibilitate electromagnetică.

Ioan Ciutea[2]

Licențiat în specializarea Electromecanică, din promoția 1970 a Facultății de Electrotehnică Iași. Ca inginer șef de secție în cadrul FRE Iași, a fost reponsabil cu probleme de distribuție a energiei electrice. Din anul 1990 este director al filialei. În colaborare cu cadre didactice de la Facultatea de Electrotehnică din Iași a realizat multiple lucrări de cercetare științifică și tehnică.

Maricel Adam[1]

Absolvent din 1985 al Facultății de Electrotehnică din Iași, este în prezent cadru didactic la această facultate. Ca doctorand, are preocupări de cercetare științifică în domeniile supravegherii și diagnosticării echipamentului electric și electronic, respectiv al modelării fenomenelor care influențează calitatea acestuia.

Eugen Hnatiuc[1]

Este absolvent din promoția 1969 a Facultății de Electrotehnică Iași, în specializarea Electromecanică. A susținut teza de doctorat în 1983. Din anul 1994 este profesor. În cercetarea științifică, articolele publicate și brevetele obținute abordează teme din domeniile aparatelor electrice de comutație la joasă tensiune, electromagneților și electroecologiei.

---

[1] Universitatea Tehnică „Gh. Asachi", Facultatea de Electrotehnică
Bd. D. Mangeron 51-53, Iași-6600, România Fax (40) 32/13 00 54
[2] RENEL-Filiala de Rețele Electrice Iași,
Str. Uzinei 38, Iași-6600, România Fax (40) 32/21 09 80

CUPRINS

Prefaţă

Istoria de aproape un secol a electrotehnicii cuprinde, ca o componentă importantă, dezvoltarea continuă şi în pas cu cerinţele mereu crescânde ale utilizatorilor, a tehnicilor de comutaţie în instalaţiile electrice de curenţi tari. In epocă, unele dintre acestea au cunoscut apogeul apoi declinul, altele noi le-au înlocuit; tehnicile moderne, utilizate în prezent pe scară tot mai mare şi cu reale perspective de generalizare în comutaţia de putere, fac obiectul cărţii de faţă.

In primele capitole ale lucrării se prezintă principalele aspecte teoretice privind comutaţia de putere în instalaţiile electrice de înaltă şi joasă tensiune. Evoluţia tehnicii de calcul a permis extinderea modelării fenomenelor de comutaţie. Preocupări şi rezultate în acest domeniu, unele proprii autorilor, sunt prezentate în carte.

Următoarele capitole sunt consacrate principalelor tehnici de comutaţie, actuale şi de perspectivă, cu utilizare în instalaţiile de putere de înaltă, respectiv joasă tesiune. Se prezintă în detaliu construcţia şi funcţionarea unor echipamente specifice tehnicilor moderne de comutaţie în hexafluorură de sulf şi vid avansat. Se acordă, de asemenea, atenţia corespunzătoare prezentării echipamentului cu comutaţie fără arc electric (sincronizată, statică, hibridă).

In lucrare este abordată problematica diagnosticării stării tehnice a echipamentelor de comutaţie, respectiv a mentenanţei acestora. Se analizează principalele tipuri de defect ale echipamentelor moderne de comutaţie, parametrii, metodele de control şi diagnostic, posibilităţile de aplicare a mentenanţei predictive.

Cartea se adresează specialiştilor din sistemul energetic naţional şi inginerilor energeticieni din intreprinderile industriale. Ea se poate dovedi utilă de asemenea profesorilor şi studenţilor de la facultăţile de profil energetic şi electric.

Prof. dr. ing. A. Vasilievici,
Universitatea Politehnica Timişoara

Cuvânt înainte

Prin scrierea acestei cărţi autorii, nutrind speranţa că reuşesc, au încercat să completeze literatura tehnică din ţara noastră cu o lucrare unitară, consacrată în exclusivitate tehnicilor moderne de comutaţie utilizate în instalaţiile electroenergetice şi electrice.

Lucrarea, cuprinzând informaţii de dată recentă cu privire la complexa problematică şi direcţiile de evoluţie ale tehnicilor moderne în comutaţia de putere, se adresează în primul rând inginerilor şi studenţilor din profilurile energetic, electric şi electromecanic dar, pentru abordarea domeniului, poate fi consultată de orice specialist în ştiinţe tehnice.

Pentru sprijinul primit în elaborarea şi tipărirea cărţii, autorii mulţumesc pe această cale tuturor colaboratorilor din cadrul RENEL Filiala de Reţele Electrice Iaşi şi din Facultatea de Electrotehnică, în mod deosebit d-rei ing. Coculeana Popa, şef al Serviciului Tehnic şi d-nei Maria Adam, secretar facultate.

Autorii

Capitolul 1

SOLICITARI DE REGIM TRANZITORIU ALE TEHNICII DE COMUTATIE

1.1. Introducere

Care este locul întrerupătorului de putere în instalaţiile electroenergetice? Răspunsul la această întrebare, doar în aparenţă retorică, este exprimat foarte plastic şi precis în [25], printr-un citat din "Single-pressure SF_6 circuit breakers" (Dekker Inc., 1984), de B. J. Calvino. Potrivit autorului acestei cărţi, întrerupătoarele de putere sunt "... aparate pe care nimeni nu le doreşte, dar de care toată lumea are nevoie. Ele trebuie astfel concepute încât, odată puse în funcţiune, să poată fi uitate în instalaţii".

Citatul transcris subliniază pe de o parte ideea omniprezenţei şi rolului esenţial al întrerupătorului de putere în instalaţiile electroenergetice şi, pe de altă parte, necesitatea ca acest aparat să răspundă în mod performant solicitării complexe la care este supus pe durata exploatării.

Dacă rolul şi locul întrerupătoarelor de putere în instalaţiile electroenergetice au rămas în general neschimbate, condiţiile tehnice şi funcţionale impuse acestor echipamente au evoluat continuu, în strânsă legătură cu dezvoltarea sistemelor electroenergetice.

Unele aserţiuni din cartea lui Charle Bresson [7], inginerul şef din 1930 al firmei Delle (Franţa), pot apărea acum ca desuete: "Pour une puissance de même ordre que précédemment (200 MVA, n. n.) ou plus élevée mais devant être transportée à une très grande

distance des usine génératrices (plusieurs centaines de kilomètres), la tension peut atteindre 220 kilo volts".

Dezvoltarea sistemelor electroenergetice face parte din dezvoltarea tehnologică generală bazată, la rândul ei, pe consumuri considerabile de energie electrică. Date fiind aceste condiţii, în momentul de faţă s-a ajuns ca marile reţele de transport să funcţioneze la tensiuni nominale de 765 kV şi mai mult, în care puterea de scurtcircuit poate atinge valori de 50...100 GVA. Astfel de cerinţe au revoluţionat în general tehnologiile de fabricare a echipamentelor electrice şi, în particular, tehnicile comutaţiei de putere.

Echipamentele electrice sunt ansambluri de dispozitive electrice, electromagnetice şi mecanice care, amplasate între surse şi consumatori, asigură regimurile normale de vehiculare a fluxurilor de energie electrică.

Regimurile de funcţionare ale instalaţiilor electroenergetice pot fi simulate prin multiple procedee, dar ele nu vor putea fi identificate decât în reţelele reale, configurate cu ajutorul elementelor de structură; acestea nu sunt altele decât echipamentele electrice. Intre regim şi structură există o complexă intercondiţionare şi numai abordarea sistemică a acesteia face posibil progresul tehnic în domeniu.

Că este aşa o dovedesc stadiul atins în construcţia de echipamente performante şi posibilităţile tehnice reale ale acestora de a controla regimurile.

Un loc aparte în cadrul elementelor de structură revine echipamentului de comutaţie care are rolul de a stabili şi întrerupe, în condiţii precizate, conducţia în circuitele electrice.

Comutaţia poate fi dinamică sau statică, după cum se realizează ca urmare a deplasării relative a unor contacte electrice specializate, respectiv pe seama variaţiei prin salt şi în limite largi a unui parametru de tip impedanţă de trecere.

In comutaţia de tip dinamic se încadrează toate echipamentele cu contacte, în timp ce comutaţia statică este proprie rezistoarelor şi bobinelor comandate.

Echipamentele electronice de putere funcţionează fără excepţie pe baza comutaţiei statice, fie că aceasta este periodică sau nu.

In instalaţiile pe care le structurează, echipamentele de comutaţie îndeplinesc un rol funcţional operativ şi un altul de protecţie. In cadrul funcţiilor operative, prin manevre comandate de multe ori manual, echipamentele de comutaţie asigură dirijarea circulaţiei de putere pe trasee rezultate ca optime din analize de regim, [18].

Funcţia de protecţie constă în asigurarea cu prioritate a protecţiei automate împotriva oricărui incident care ar putea perturba regimul normal al instalaţiei sau chiar ar constitui un pericol pentru aceasta şi factorul uman, [23]. Modul în care echipamentul de comutaţie îndeplineşte funcţiile menţionate este hotărâtor în ceea ce priveşte asigurarea disponibilităţii şi securităţii subsistemelor electroenergetice.

Dezvoltarea diferitelor tehnici în comutaţia de putere este strâns legată pe de o parte de cerinţele crescânde ale utilizatorilor de energie electrică şi, pe de altă parte, de modul în care constructorii de echipament au răspuns acestor cerinţe, oferind elementele de structură pentru realizarea unor sisteme capabile să vehiculeze fluxuri electroenergetice de valori foarte mari.

Progresele înregistrate în domeniul tehnicii de comutaţie se bazează pe cunoaşterea unui complex de fenomene care au loc simultan şi se intercondiţionează, fiind uneori greu de stăpânit. Procese electrice, termice, electrodinamice, mecanice, influenţele factorilor de mediu, fenomenele legate de funcţionarea contactelor electrice, de îmbătrânirea materialelor etc. ridică serioase obstacole în calea realizării unui nou echipament.

Organisme ştiinţifice internaţionale de înaltă autoritate precum IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) în SUA, acordă o atenţie deosebită dezvoltării tehnicilor de comutaţie. "IEEE Power Engineering Society" este organizaţia membrilor IEEE care are drept scop realizarea progresului ştiinţific şi aplicativ în domeniile producerii, transportului, distribuţiei şi utilizării energiei electrice. In "IEEE Transactions on Power Delivery", prestigioasa revistă a acestei societăţi, un loc important

revine articolelor elaborate sub egida comitetului specializat în problemele echipamentului de comutaţie (Switchgear Committee).

In Europa, CIGRE (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electriques) este un organism internaţional constituit din mai multe comitete de studii, fiecare având în subordine grupuri de lucru, grupuri de lucru comune şi grupuri de acţiune.

Comitetul de Studii 13, reunind preocupările CIGRE în domeniul echipamentului de comutaţie cu contacte, efectuează în ultimii ani cercetări pe următoarele teme [9], [11], [19], [20], [28], [29]:

-tendinţele de dezvoltare pe termen scurt şi lung a echipamentelor de comutaţie şi impactul acestora asupra comportamentului reţelelor în regim tranzitoriu;

-tehnologii noi şi alternative posibile pentru echipamentul de comutaţie utilizat până în prezent;

-fiabilitatea şi disponibilitatea care caracterizează echipamentele în funcţiune şi, în particular, întrerupătoarele de înaltă tensiune;

-tehnici de diagnostic şi supraveghere a echipamentelor de comutaţie;

-aplicarea tehnicilor de comutaţie controlată şi impactul asupra funcţionării reţelelor.

Având în vedere generalizarea utilizării instalaţiilor capsulate cu izolaţie în hexafluorură de sulf şi progresele înregistrate în implementarea echipamentelor de comutaţie statică în instalaţiile electroenergetice, la definirea subiectelor preferenţiale de cercetare teoretică şi aplicată în domeniul echipamentelor de comutaţie iau parte şi alte comitete de studii, [1], [16], [22], [29]. In Tab.1.1 se prezintă sintetic principalele structuri din cadrul CIGRE, cu activitate nemijlocită în domeniul tehnicilor de comutaţie dinamică şi statică.

Astfel, începând din 1991, Comitetul de Studii 14 abordează, pe lângă problematica legăturilor în curent continuu la înaltă tensiune (CCHT) şi pe cea a echipamentelor electronice de putere, cunoscute sub denumirea "Sisteme reglabile de transmisie în curent alternativ" (Flexible AC Transmission Systems-FACTS). Sesiunea CIGRE din 1994 a fost prima în care legăturile CCHT şi

Tab.1.1

Structuri ale CIGRE interesând domeniul tehnicilor de comutaţie dinamică şi statică: CS-comitet de studii, GL-grup de lucru, GA-grup de acţiune, GLC-grup de lucru comun

CS 13 Echipament de comutaţie	CS 14 Conexiuni în c.c. şi echipamente electronice de putere	CS 23 Staţii şi posturi de transformare	CS 38 Analize şi tehnici în sisteme de putere
GL 13.01 Aplicaţii practice ale fizicii arcului în întrerupătoare	GL 14.01 Valve pentru sisteme de înaltă tensiune în c.c.		
GL 13.04 Metode de încercare în domeniul comutaţiei	GLC 13/ 14.08 Echipament de comutaţie		
GL 13.06 Fiabilitatea întrerupătoarelor	GL 14.14 Sisteme flexibile de transmisie în c.a.	GL 23.10 Instalaţii capsulate cu izolaţie în SF_6	GA 38.01.08 Modelarea echipamentelor electronice de putere
GL CC 03 Problematica tensiunii tranzitorii de restabilire	GL 14.17 Dispozitive semiconductoare de putere		
GA 13.00.1 Comutaţie controlată			

FACTS au fos analizate împreună, [24]. Punerea la punct în cadrul FACTS a compensatoarelor statice de putere reactivă, a primelor prototipuri de compensatoare serie comandate cu tiristoare, studiul posibilităţilor de realizare a unor echipamente polifuncţionale (limitator de supracurent şi compensator serie, [19]) evidenţiază importanţa majoră a funcţiei de comutaţie în instalaţiile electroenergetice, indiferent că aceasta se realizează utilizând echipamente cu sau fără contacte sau că este de tip aleator sau periodic.

Atingerea performanţelor actuale şi de perspectivă specifice tehnicilor comutaţiei de putere este strâns legată de preocupările cercetării ştiinţifice privind supravegherea stării tehnice reale a echipamentelor, diagnosticarea şi predicţia duratei de viaţă a acestora pe termen scurt şi lung precum şi de adoptarea unor politici de mentenanţă având la bază date obţinute prin monitorizare, [12], [13].

Datorită funcţiilor îndeplinite potrivit concepţiilor tehnice actuale, echipamentele de comutaţie reprezintă în instalaţii adevărate "concentratoare de eforturi", pe durata funcţionării acestea fiind supuse unor solicitări complexe, de naturi diverse şi cu intensităţi de valori mari.

In stabilirea soluţiilor tehnice şi în fabricarea echipamentelor de comutaţie moderne, constructorii sunt obligaţi să ţină seama de toate aceste solicitări, astfel încât produsele obţinute la parametrii electrici impuşi să se caracterizeze, în acelaşi timp, prin indicatori de fiabilitate cât mai înalţi, cheltuieli de exploatare reduse, dimensiuni de gabarit mici, consum diminuat de materiale active, independenţă funcţională faţă de condiţiile de mediu, preţ competitiv etc.

In cea de a doua jumătate a acestui prim secol din istoria aplicaţiilor industriale ale electricităţii, pe fondul dezvoltării tehnologice generale şi beneficiind în special de aplicaţiile puse la punct în domeniile de vârf, constructorii au realizat tehnici moderne în comutaţia de putere, capabile să satisfacă pe deplin cerinţele impuse de evoluţia sistemelor electroenergetice.

1.2. Regimuri tranzitorii de conectare

Intrerupătorul ideal având, din punct de vedere funcţional, două stări stabile (închis-deschis, conectat-deconectat, anclanşat-declanşat etc.), se poate reprezenta sub forma unui dipol cu următoarele caracteristici:

-impedanţă de trecere nulă pe durata conducţiei (întrerupător închis);

-impedanţă de trecere infinită (pentru a asigura întreruperea conducţiei) şi nivel de izolaţie corespunzător (pentru a suporta tensiunea la borne), în cazul întrerupătorului deschis;

-capabilitate de trecere de la o stare la alta în mod instantaneu, sincron cu unul din momentele anulării intensităţii curentului, când sunt nule atât energia magnetică înmagazinată în bobinele circuitului care conţine întrerupătorul cât şi energia termică degajată prin efect electrocaloric în rezistenţele acestuia.

1.2.1. Regimul de scurtcircuit

Cerinţelor de ordin funcţional prezentate li se adaugă cele tehnice, constând în capabilitatea echipamentului de a suporta pe durata funcţionării solicitări de un anumit tip, având intensităţi variabile între limite precizate. Intre acestea un loc important îl ocupă cele de natură electromagnetică, prezente în oricare din etapele de funcţionare specifice unui echipament de comutaţie.

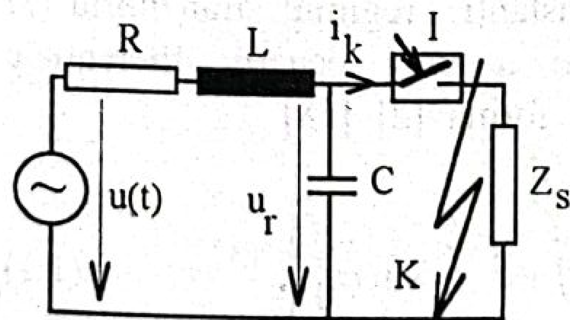


Fig.1.1

Schema electrică de conectare pe scurtcircuit

In general, sub raportul comutaţiei propriuzise, conectarea circuitelor nu ridică probleme tehnice deosebite. Totuşi, după momentul efectuării acestei manevre, solicitarea instalaţiei şi a echipamentului poate atinge valori maxime dacă, prin închiderea contactelor întrerupătorului de putere, în instalaţie se stabileşte un regim de scurtcircuit. Traversate de curenţii de scurtcircuit, căile

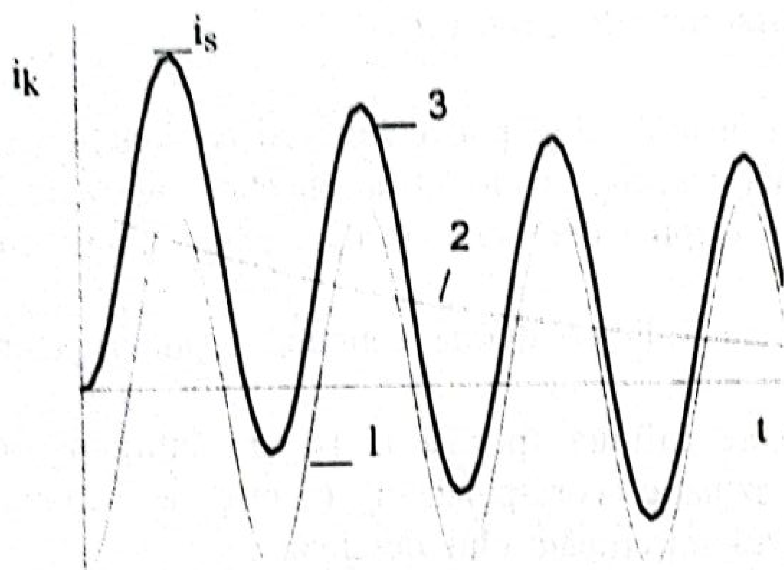


Fig.1.2

Regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit depărtat: 1-componenta periodică; 2-componenta aperiodică; 3-curentul rezultant.

conductoare ale tehnicii de comutaţie suportă intense solicitări termice şi electrodinamice; acestea iau valori în domenii de variaţie ce pot fi extinse până la limitele de stabilitate termică şi electrodinamică.

In instalaţiile trifazate regimul de scurtcircuit poate fi simetric (trifazat) sau nesimetric (bifazat cu sau fără punere la pământ, monofazat). Calculul curentului de scurtcircuit trifazat este necesar pentru verificarea stabilităţii termice şi electrodinamice a echipamentului de comutaţie, alegerea şi reglarea echipamentelor de protecţie efectuându-se pe baza calculelor corespunzătoare tuturor tipurilor de scurtcircuit.

In cazul scurtcircuitului depărtat (Fig.1.1) defectul se produce la distanţă suficient de mare de bornele sursei, ale cărei impedanţe pot fi neglijate în raport cu cele ale reţelei; deoarece aceasta din urmă are parametri constanţi, regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit, ca soluţie a unei ecuaţii diferenţiale ordinare de ordinul întîi, se obţine de forma [2], [18]:

$$i_k(t) = \sqrt{2} I_k \left[\sin\left(\omega t - \varphi_0\right) + e^{-\frac{t}{T}} \sin \varphi_0 \right], \qquad (1.1)$$

unde I_k este valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit de regim permanent, φ_0-unghiul de conectare, iar T-constanta de timp a circuitului. Componenta aperiodică rezultă maximă dacă $\varphi_0=\pi/2$.

In Fig.1.2 se prezintă regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit depărtat, cu evidenţierea componentelor acestuia.

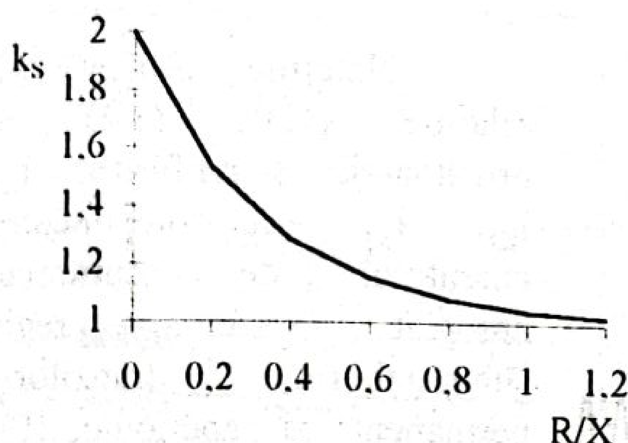


Fig.1.3
Valorile coeficientului de şoc

Valoarea de vârf maximă a curentului de scurtcircuit i_S, numită curent de şoc sau de lovitură, se înregistrează pentru $\omega t=\pi$ şi se obţine de forma:

$$i_S = k_S \sqrt{2} I_k, \qquad (1.2)$$

unde k_S este coeficientul (factorul) de şoc sau de lovitură. Valorile acestuia, dependente de raportul R/X, sunt date în diagrama din Fig.1.3.

In cazul defectelor produse în apropierea bornelor generatorului devin preponderente reactanţele acestuia, care sunt variabile în timp pe durata regimului (scurtcircuit apropiat). De data aceasta, componenta periodică a curentului de scurtcircuit este amortizată după două constante de timp, corespunzătoare regimurilor subtranzitoriu, respectiv tranzitoriu ale generatorului.

In ipoteza unui scurtcircuit produs la bornele generatorului [16], curentul de regim tranzitoriu are expresia:

$$i_k(t) = i_{ks}(t) + i_{kt}(t) + i_{kp}(t) + i_{ka}(t), \qquad (1.3)$$

unde:

$$\left.\begin{aligned} & i_{ks}(t) = \sqrt{2}\left(I_k'' - I_k'\right) e^{-\frac{t}{T_s}} \sin\left(\omega t - \varphi_0\right), \\ & i_{kt}(t) = \sqrt{2}\left(I_k' - I_k\right) e^{-\frac{t}{T_t}} \sin\left(\omega t - \varphi_0\right), \\ & i_{kp}(t) = \sqrt{2} I_k \sin\left(\omega t - \varphi_0\right), \quad i_{ka}(t) = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{t}{T}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.4)$$

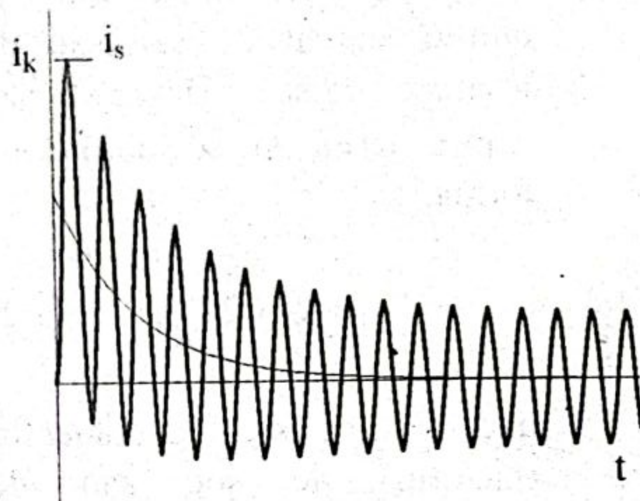


Fig.1.4

Regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit apropiat: i_s-curentul de şoc.

Notaţiile utilizate în relaţiile (1.3), (1.4) au următoarele semnificaţii: i_{ks}, i_{kt}, i_{kp}, i_{ka}-componentele curentului de scurtcircuit apropiat de regim subtranzitoriu, tranzitoriu, permanent şi aperiodic, I''_k, I'_k, I_k-valorile efective ale curenţilor de scurtcircuit corespunzătoare respectiv regimurilor subtranzitoriu, tranzitoriu şi permanent, T_s, T_t, T-constantele de timp.

Modul de variaţie temporală a curentului de scurtcircuit apropiat depinde de construcţia generatorului (poli masivi sau aparenţi, cu sau fără bare amortizoare), forma tipică fiind prezentată în Fig.1.4.

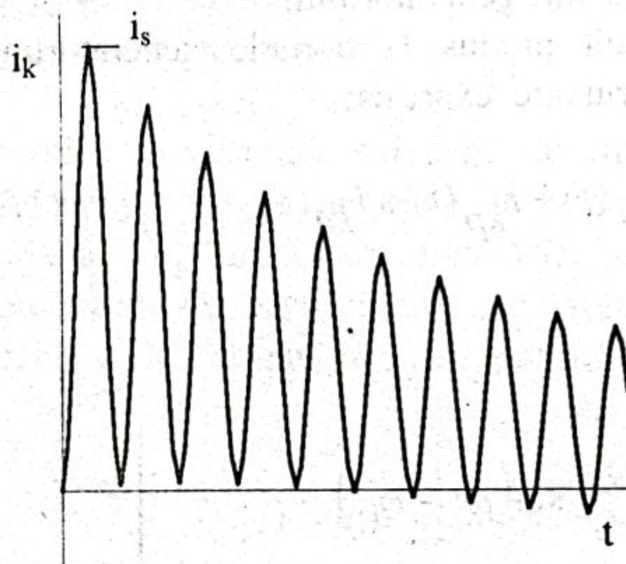


Fig.1.5

Intârzierea anulării intensităţii curentului de scurtcircuit

In cazul regimului de scurtcircuit apropiat factorul de şoc se aplică valorii de vârf a curentului de scurtcircuit simetric iniţial, astfel încât curentul de şoc se calculează cu relaţia:

$$i_s = \sqrt{2} k_s I''_k . \qquad (1.5)$$

Defectele care apar în instalaţiile trifazate şi relaţiile de calcul pentru valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit simetric iniţial sunt prezentate în Tab.1.2, în care U reprezintă valoarea efectivă a tensiunii între faze, Z-impedanţa directă a circuitului, Z_0-impedanţa homopolară, Z_p-impedanţa traseelor prin pământ.

Tipul de scurtcircuit	Valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit simetric inițial
Trifazat	$I''_{k3} = \dfrac{1,1U}{\sqrt{3}Z}$
Bifazat	$I''_{k2} = \dfrac{1,1U}{2Z}$
Monofazat	$I''_{k1} = \dfrac{1,1\sqrt{3}U}{2Z + Z_0 + 3Z_p}$

Modul de variație în timp a curentului de scurtcircuit nu influențează solicitările suportate de întrerupător doar pe durata funcționării acestuia cu contactele închise. Defectele care au loc la bornele generatoarelor de puteri mari, caracterizate prin valori X/R de ordinul 80...200 [25], introduc componente aperiodice de curent continuu cu valori mari și care se amortizează greu. Este posibil ca, în anumite condiții [25], [33], momentul primei anulări a intensității curentului de scurtcircuit să întârzie (Fig.1.5), fapt care poate conduce la dificultăți în stingerea arcului care însoțește întreruperea unui astfel de curent. Evitarea deconectării în aceste

condiții este posibilă fie prin creșterea rezistenței ohmice a circuitului, fie prin temporizarea separării contactelor până la prima anulare a intensității curentului; evident, al doilea procedeu nu trebuie să afecteze stabilitatea termică a echipamentului.

1.2.2. Solicitări termice și electrodinamice

Solicitările termice și electrodinamice ale tehnicii de comutație, dependente de curentul care le generează, sunt maxime în timpul regimului de scurtcircuit. Acesta are durată limitată obișnuit la 0,25...2 s, fiind înlăturat ca urmare a funcționării protecției și a tehnicii de comutație însăși. In rețelele actuale intensitatea curentului de scurtcircuit este de cel puțin 10 ori mai mare decât cea a curentului nominal, iar temperatura căilor conductoare poate ajunge la de 3...4 ori valoarea maximă admisibilă corespunzătoare solicitării termice de lungă durată, proprie regimuurilor normale de funcționare.

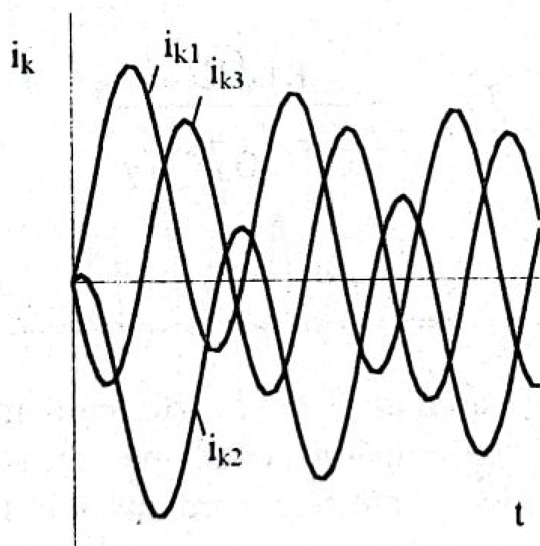


Fig.1.6
Regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit trifazat

Solicitările termice și electrodinamice produse sub acțiunea curentului de scurtcircuit, dependent de configurația și parametrii rețelei, trebuie să se încadreze în limitele admise pentru tehnica de comutație căreia, pe toată durata funcționării, trebuie să i se asigure stabilitatea termică și electrodinamică.

Solicitarea termică la scurtcircuit este de scurtă durată, creșterea admisibilă de temperatură fiind mai mare decât în cazul solicitării de lungă durată; stabilitatea termică a tehnicii de comutație este asigurată dacă temperatura finală a încălzirii nu depășește o valoare limită admisibilă.

Potrivit standardelor din România, puse în acord de altfel cu recomandările CEI[1], solicitarea termică admisibilă la scurtcircuit pentru un întrerupător de putere de înaltă tensiune este precizată prin durata limită admisibilă t (1 s sau 3 s), de menţinere a curentului de scurtcircuit având intensitatea I_{pr}, corespunzătoare capacităţii nominale de deconectare. In aceste condiţii, solicitarea termică admisibilă la scurtcircuit σ_{ad}, este dată de relaţia [2]:

$$\sigma_{ad} = I_{pr}^2 t. \qquad (1.6)$$

Pentru verificarea stabilităţii termice la scurtcircuit a unui întrerupător trebuie satisfăcută relaţia:

$$\sigma(t_k) \le \sigma_{ad}, \qquad (1.7)$$

unde $\sigma(t_k)$ este solicitarea termică produsă de curentul de scurtcircuit, existent pe durata t_k; solicitarea termică la scurtcircuit, $\sigma(t_k)$ se determină prin mijloace specifice, de exemplu prin metoda curentului echivalent de scurtcircuit [2], [17], [18].

Solicitările electrodinamice ale tehnicii de comutaţie sunt produse sub acţiunea forţelor de interacţiune care apar între căi conductoare parcurse de curenţi înlănţuiţi printr-un câmp magnetic comun. Ca şi în cazul proceselor termice, intensitatea maximă a solicitării electrodinamice are loc sub acţiunea curenţilor de scurtcircuit, pe durata tranzitorie [10]. In Fig.1.6 este reprezentat grafic regimul tranzitoriu al curentului de scurtcircuit trifazat, care serveşte ca bază pentru evaluarea solicitărilor electrodinamice ale tehnicii de comutaţie.

Expresia generală de calcul a forţei de interacţiune dintre două căi conductoare parcurse de curenţi este de forma:

$$F = 10^{-7} K i_1 i_2, \qquad (1.8)$$

---

[1] Comisia Electrotehnică Internaţională

unde i_1, i_2 sunt intensitâţie curenţilor, iar K-o constantă adimensională, cu valori dependente de geometria sistemului.

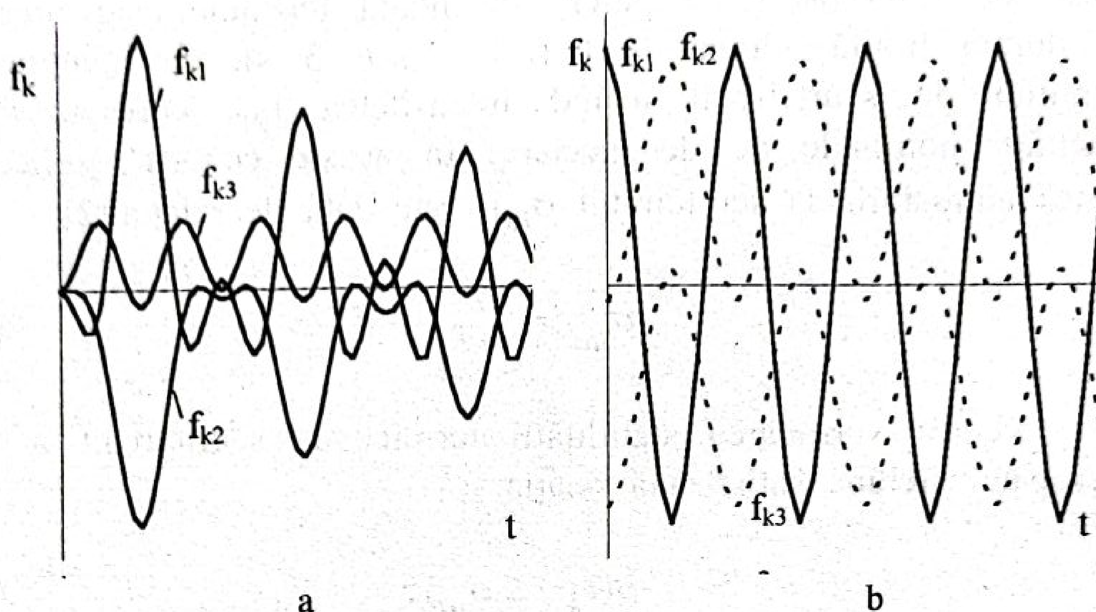


Fig.1.7

Forţe electrodinamice într-un sistem trifazat de conductoare coplanare: a-regimul tranzitoriu; b-regimul permanent.; f_{k1}-forţa electrodinamică pe calea conductoare centrală; f_{k2}, f_{k3}-forţele electrodinamice pe căile conductoare laterale.

Analiza forţelor electrodinamice de interacţiune dintre căile conductoare, paralele şi coplanare, ale unui sistem aferent tehnicii de comutaţie, produse sub acţiunea unui sistem trifazat de curenţi de scurtcircuit pe durata regimului tranzitoriu, pune în evidenţă faptul că solicitarea maximă este înregistrată pe calea de curent centrală. In Fig.1.7a sunt reprezentate forţele electrodinamice care solicită un astfel de sistem, corespunzătoare căii conductoare centrale (f_{k1}), respectiv celor laterale (f_{k2}, f_{k3}). Forţele electrodinamice de regim permanent (Fig.1.7b) nu modifică localizarea solicitării maxime, care se înregistrează de asemenea pe calea de curent centrală, supusă acţiunii unui ciclu alternant simetric; conductoarele laterale sunt solicitate la cicluri alternante nesimetrice, existând tendinţa de respingere a acestora în raport cu conductorul central.

Verificarea stabilităţii electrodinamice a întrerupătoarelor de înaltă tensiune coincide cu verificarea capacităţii lor de conectare şi

a stabilității contactelor, [6], [14]. Intre capacitatea nominală de conectare (i_ℓ) și cea de deconectare (I_{pr}, componentă periodică) există relația:

$$i_\ell \cong 2{,}5 I_{pr}. \qquad (1.9)$$

Tehnicile moderne de comutație se disting, printre altele, prin parametri electrici performanți. Atingerea unor valori înalte, de 63-80 kA pentru capacitatea nominală de deconectare impune și soluționarea problemei creșterii nivelurilor de stabilitate termică și electrodinamică, specifică acestor echipamente, [15].

1.3. Regimuri tranzitorii de deconectare

Intrerupătorul de putere este unicul echipament capabil să întrerupă cei mai mari curenți care pot apărea într-o instalație. Această funcție este îndeplinită în intervalele de timp foarte scurte ale regimurilor tranzitorii de deconectare care, sumate toate, reprezintă un procent extrem de redus din durata de viață a echipamentului.

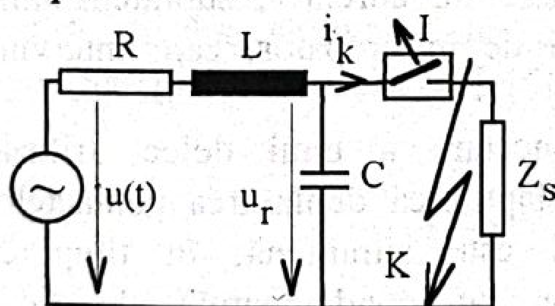


Fig.1.8
Schema electrică de deconectare a unui scurtcircuit

În cazul comutației dinamice (cu contacte deplasate mecanic), deconectarea este întotdeauna însoțită de amorsarea arcului electric în camera de stingere. Schema electrică de deconectare a unui curent de defect produs la bornele întrerupătorului este dată în Fig.1.8.

Arcul electric amorsat la deconectare între contactele întrerupătorului îndeplinește condițiile de stingere definitivă într-un interval foarte scurt de timp, conținând unul din momentele anulării intensității curentului, fie acesta t_0 (Fig.1.9). Intreruperea este însă cu atât mai dificilă cu cât, pe măsură ce dispozitivele specializate de stingere a arcului electric

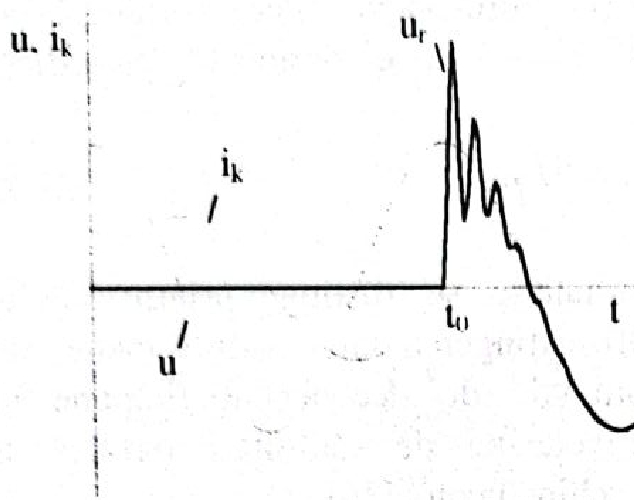


Fig.1.9

Regimul tranzitoriu de deconectare: u- tensiunea sursei de alimentare; i_k- intensitatea curentului; u_r-tensiunea tranzitorie de restabilire.

acţionează în vederea refacerii rigidităţii dielectrice a spaţiului dintre contacte, prin reacţia reţelei acestuia i se aplică tensiunea tranzitorie de restabilire.

Pe durata arderii arcului electric o astfel de reacţie introduce dificultăţi suplimentare privind stingerea definitivă, iar după obţinerea acesteia, tensiunea tranzitorie de restabilire se aplică izolaţiei instalaţiei, constituind pentru aceasta o supratensiune de comutaţie.

In mod obişnuit parametrii supratensiunilor de comutaţie (valoarea maximă, factorul de oscilaţie, frecvenţa proprie) depind exclusiv de caracteristicile reţelei. In cazuri speciale de deconectare, când stingerea definitivă a arcului electric se produce la valori nenule ale intensităţii curentului ("tăiere de curent"), supratensiunile de comutaţie au valori dependente şi de întrerupător, care intervine cu mărimea curentului "tăiat".

Regimul tranzitoriu de deconectare a unui defect trifazat trebuie analizat ţinându-se seama de faptul că deplasarea contactelor pe cei trei poli ai întrerupătorului este simultană, în timp ce momentele de anulare a curenţilor pe conductoarele de fază, marcând fiecare stingerea posibilă a arcului electric, este defazată cu $2\pi/3$. De asemenea trebuie avute în vedere legăturile şi punerile la pământ din reţeaua analizată.

Schema electrică de deconectare a unui scurtcircuit produs la bornele întrerupătorului într-o reţea trifazată este reprezentată în Fig.1.10.

Conform acesteia, valoarea efectivă corespunzătoare componentei de frecvenţă industrială a tensiunii tranzitorii de restabilire ce apare la polul care întrerupe primul (polul 1, Fig.1.10), se calculează cu relaţia :

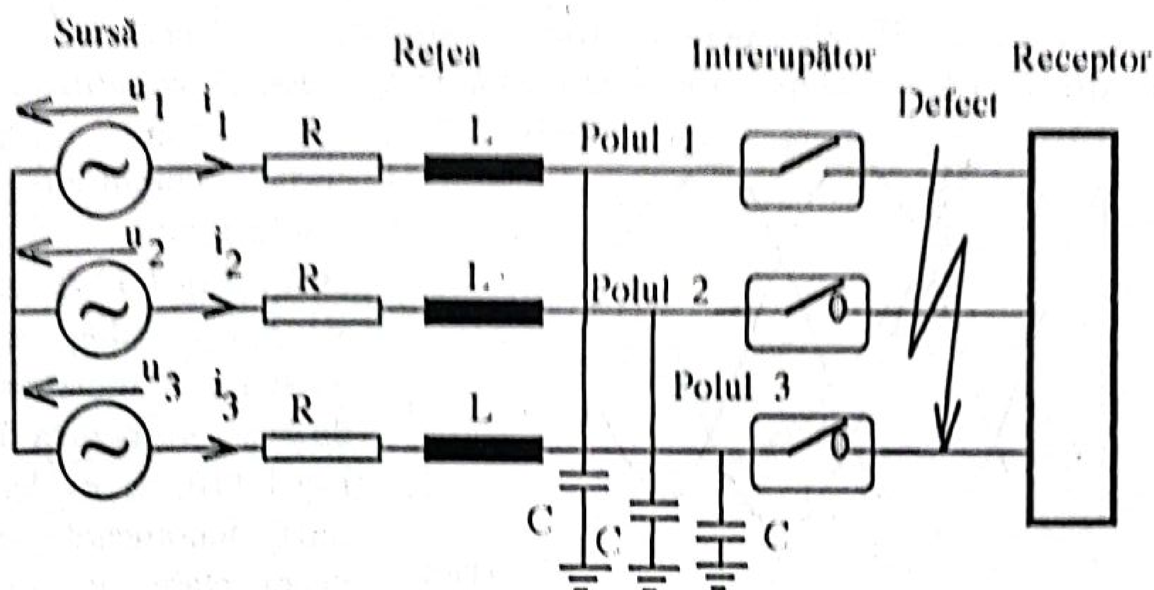


Fig.1.10
Schema electrică a întreruperii unui defect trifazat

$$U_{r1} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} U_n, \tag{1.10}$$

în timp ce, pentru ceilalți doi poli, la care stingerea definitivă a arcului are loc simultan, dar cu o întârziere unghiulară de $\pi/2$ în raport cu primul, rezultă [2], [5], [17], [18]:

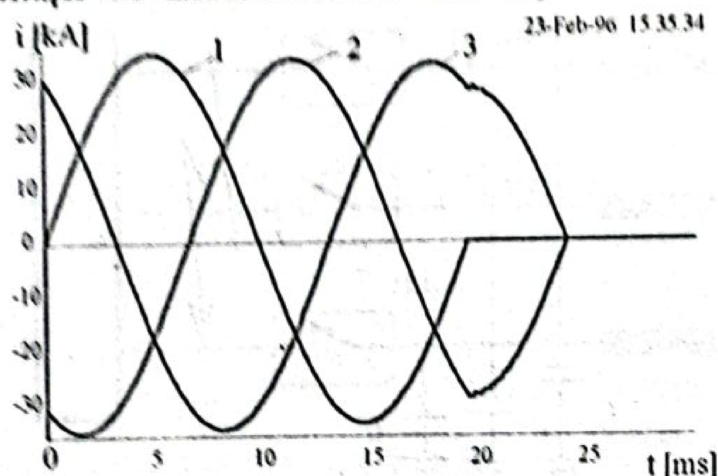
$$U_{r2} = U_{r3} = \frac{U_n}{2}, \tag{1.11}$$

unde U_n este tensiunea nominală. Dacă se notează cu γ factorul de oscilație, pentru valorile de vârf ale tensiunii tranzitorii de restabilire pe cei trei poli se obține:

$$u_{m1} = \frac{1,5\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \gamma U_n, \; u_{m2} = u_{m3} = \frac{\gamma U_n}{\sqrt{2}}. \tag{1.12}$$

Rezultatele simulării regimului tranzitoriu de deconectare a unui scurtcircuit trifazat într-o rețea de 400 kV sunt prezentate în

Fig.1.11, [5]. Simularea a fost efectuată cu ajutorul EMT Program (versiunea ATP-1992), pentru care Catedra de Energetică a Facultăţii de Electrotehnică din Iaşi-România are licenţă de utilizare.



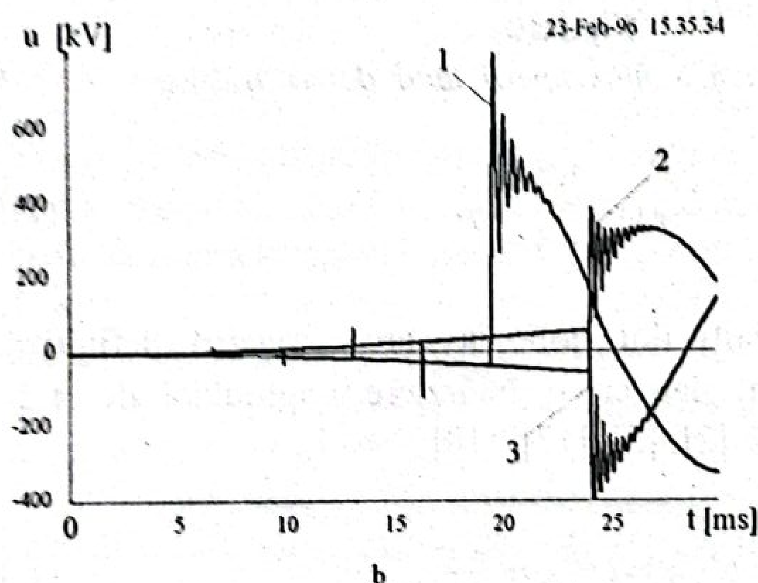


Fig.1.11

Regimul tranzitoriu de deconectare trifazată: a-curenţii pe conductoarele de fază; b-tensiunea tranzitorie de restabilire.

Atât prin curbele curenţilor pe conductoarele de fază (Fig.1.11a) cât şi prin diagrama tensiunilor tranzitorii de restabilire dată în Fig.1.11b, se evidenţiază fenomenele de deconectare la primul pol, factorul de amplitudine având valoarea γ=1,6.

EMT Program furnizează la cerere puterile active şi energiile corespunzătoare diferitelor ramuri ale reţelei în care se efectuează calcule de regim tranzitoriu. Curbele de variaţie în timp a puterii şi energiei arcului electric de deconectare care însoţeşte, pe fiecare pol în parte, regimul tranzitoriu simulat sunt prezentate în Fig.1.12.

Procesele de comutaţie dinamică nu pot fi imaginate fără intervenţia arcului electric. Proprietăţile arcului electric de deconectare conferă acestuia capabilitatea de a întrerupe circuitul la trecerea prin zero a curentului; această proprietate introduce o relaţie de sincronizare între comutaţie şi reţea, cu efecte favorabile

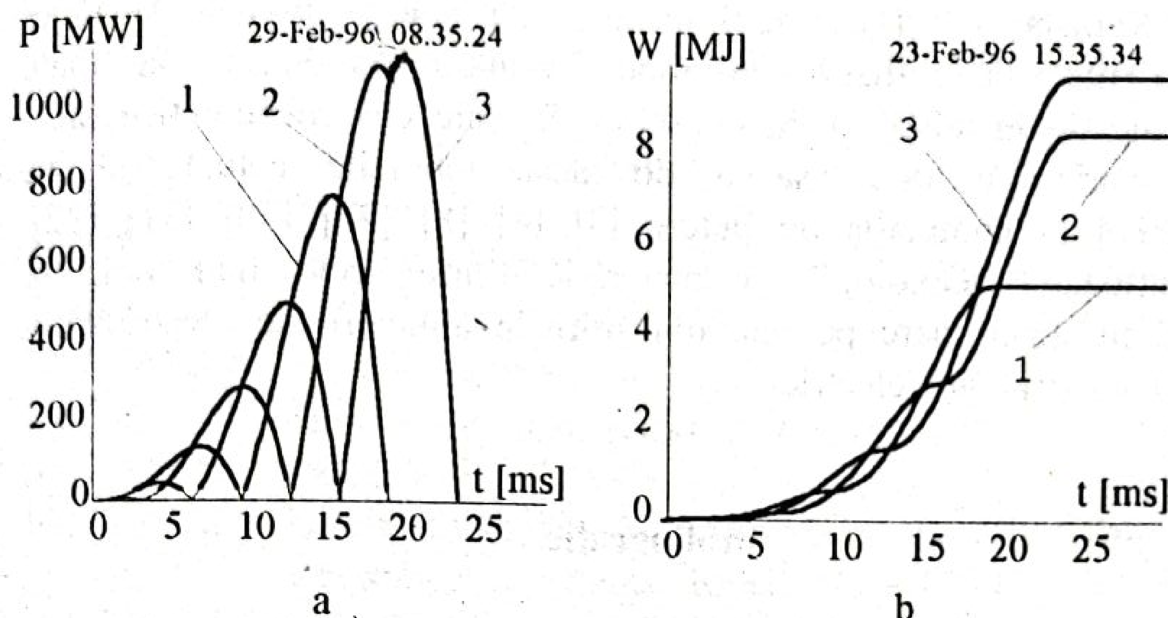


Fig.1.12

Puterea și energia în coloana arcului la deconectarea trifazată: a-puterea; b-energia; 1-polul care deconectează primul; 2, 3- polii care deconectează ultimii.

privind solicitările în camera de stingere și la nivelul izolației externe.

Sincronizarea introdusă de arcul electric este practic imposibil de realizat prin alte procedee. In sprijinul acestei afirmații se consideră exemplul întreruperii unui curent alternativ cu amplitudinea de numai 10 kA care, la 1 ms înainte de momentul anulării, atinge valoarea momentană de 3 kA, iar la 0,1 ms, de 300 A. Este foarte dificil de imaginat un sistem mecanic capabil să răspundă, cu viteze suficient de mari și dispersie extrem de redusă, pentru a deveni comparabil, sub acest raport, cu arcul electric. Mai mult, apariția tensiunii tranzitorii de restabilire complică procesul de comutație, distanța dintre contacte trebuind să atingă valori suficient de mari pentru a se evita străpungerea.

Dacă în accepția cea mai simplă se consideră întrerupătorul realizat din două contacte care se separă la trecerea prin zero a curentului, pentru a se crea distanța de izolație necesară preluării fără defectare a tensiunii tranzitorii de restabilire, acestea ar trebui să se depărteze cu viteze de kilometri pe secundă [23], complet inaccesibile sistemelor mecanice actuale.

Rămâne astfel ca arcul electric, cu reacţii produse la nivel de particule, să realizeze în mod avantajos comutaţia în toate categoriile de instalaţii şi cu deosebire în cele electroenergetice, de puteri mari. Că este aşa o dovedesc tehnicile actuale şi de perspectivă în comutaţia de putere [3], [4], [8], [27], [30], [31], [32], care, utilizând tehnologii şi materiale dintre cele mai noi, se bazează în funcţionare pe una din primele aplicaţii ale electricităţii, descărcarea prin arc electric.

Bibliografie

1. Assailly P., Progress report of CIGRE study committee 14 (Substations) for 1994. Electra, 160, 65 (1994).
2. Baraboi A., Echipamente electrice. Inst. Polit. Iasi, 1989.
3. Baraboi A., Furnică E., Tendinţe actuale în tehnica echipamentelor de comutaţie cu vid. Energetica, 37, 7, 304 (1989).
4. Baraboi A., Adam M., Intrerupătoare de putere cu comutaţie în hexafluorură de sulf. Energetica, seria B, 5, 219 (1992).
5. Baraboi A., Adam M., Leonte P., Modélisation de l'arc électrique dans l'appareillage de coupure THT. Very High Voltage Networks Symposium, Sibiu, Romania, I, 147 (1995).
6. Braumann P., Lang J., Schröder K. H., Développement des matériaux de contact pour appareils de commutation à fort courant. RGE, 9, 12 (1992).
7. Bresson Ch., Appareillage électrique haute tension. Dunod, Paris, 1930.
8. Ciboldi P., Perdoncin F., Talpo G., Le domaine d'emploi des disjoncteurs moyenne tension à SF_6. Journée SF_6, AIM Liège (1988).
9. Ciok Z., Jankowicz S., Poniecki W., Modelling and Investigation of Interaction between Arc Energy and Operating Mechanism of GCB. Report 13-106, CIGRE (1994).
10. Ciunihin A. A., Elektriceskie apparatî. Energhiia, Moskva, 1975.

11. Colombo E., Emolumento E., Paganini E., Placentino L., Tondello G., Application of an Optical Monitoring System for the Assessment of Internal Conditions of an HV Circuit-Breaker. Report 13-205, CIGRE (1994).
12. Cookson A. H., General Report of Study Committee 15, CIGRE Session 1994. Electra 158, 38, (1995).
13. Damstra G. C., Janssen A. L. J., General Report of Study Committee 13, CIGRE Session 1994. Electra 158, 26, (1995).
14. Fechant L., Carballeira A., Les contacts électriques: une décennie de progrès. RGE, 11, 2 (1994).
15. Flurscheim C. H., Teoriia i konstrukţii vîkliuciatelei. Energoizdat, Leningrad, 1982 (trad. din lb. engleză).
16. Hingorani N., Reynolds M. A., Progress report of CIGRE study committee 14 (DC links and power electronics equipment) for 1994. Electra, 160, 35 (1994).
17. Hortopan Gh., Aparate electrice, EDP București, 1981.
18. Hortopan Gh., Aparate electrice de comutaţie. Ed. Tehnică, București, 1993.
19. Janssen A. L. J., Degen W., Heising C. R., Bruvik H., Colombo E., Lanz W., Fletcher P., Sanchis G., A Summary of the Final Results and Conclusions of the Second International Enquiry on the Reliability of High Voltage Circuit Breakers. 13-202, CIGRE (1994).
20. Jones C. J., Hall W. B., Jones G. R., Fang M. T. C., Wiseall S. S., Recent Development in Theoretical Modelling and Monitoring Techniques for High Voltage Circuit-Breakers. Report 13-109, CIGRE (1994).
21. Karady G. G., Concept of a Combined Short Circuit Limiter and Series Compensator. IEEE Trans. on Power Delivery, 6, 3, 1031 (1991).
22. Meyer B., Progress report of CIGRE study committee 38 (Power system analysis and techniques) for 1994. Electra, 160, 97 (1995).

23. Pelenc Y., Appareillage électrique d'interruption à haute tension. Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
24. Povh D., General Report of Study Committee 14, CIGRE Session 1994. Electra 158, 32, (1995).
25. Ryan H. M., Jones G. R., SF_6 Switchgear. Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.
26. Scarpa P., Les modèles d'arc: de outils de développement des disjoncteurs. Journée SF_6, AIM Liège (1988).
27. Thuries E., Dufournet D., Conception et évolution des disjoncteurs haute et moyenne tension. RGE, 11, 63 (1992).
28. Voumard P. R., A Simple Approach to Condition Monitoring of Circuit Breakers. Report 13-203, CIGRE (1994).
29. Völcker O., Progress report of CIGRE study committee 13 (Switching equipment) for 1994. Electra, 160, 25 (1995).
30. * * * Intrerupătoare cu SF_6 tip H 14 P 40, Electroputere Craiova, România.
31. * * * SF_6 Circuit-Breaker HPL-A. Catalogue ABB Publ. SESWG/B 2312 E (1990).
32. * * * SF_6 Circuit-Breaker HPL-B. Catalogue ABB Publ. SESWG/B 2313 E (1990).
33. * * * Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers. Ed. by Kunio Nakanishi, Marcel Dekker Inc. New York-Basel-Hong Kong, 1991.

Capitolul 2

COMUTATIA DINAMICA

Echipamentele de comutaţie reprezintă o clasă importantă a echipamentelor electrice, având rolul de a stabili, menţine şi întrerupe conducţia în circuitele instalaţiilor electrice.

Comutaţia în instalaţiile electrice se poate executa din considerente operative dar, de multe ori, aceasta are de fapt rol de protecţie; realizarea protecţiei prin comutaţie se exemplifică prin funcţionarea instalaţiilor RAR şi prin deconectarea propriuzisă într-un timp dat, a curenţilor de suprasarcină şi de scurtcircuit.

Comutaţia circuitelor poate fi dinamică sau statică, după cum echipamentele de comutaţie realizează această operaţie pe cale mecanică, prin închiderea şi deschiderea unor contacte electrice, respectiv prin variaţia comandată a unui parametru electric de tip impedanţă (în particular rezistenţă), specifică echipamentelor de comutaţie fără contacte.

Comutaţia este însoţită de regimuri tranzitorii ale curenţilor şi tensiunilor, capabile să producă asupra componentelor instalaţiilor electrice solicitări cu intensităţi mai mari decât cele înregistrate în orice regim permanent de funcţionare. Dacă procesele fizice care apar în echipamentele de comutaţie la conectarea circuitelor prezintă uneori mai mică importanţă, deconectarea dinamică, însoţită inevitabil de amorsarea arcului electric între contacte, introduce elemente de suprasolicitare, produse ca urmare a transferului de energie din coloana arcului spre componentele constructive din imediata vecinătate. Este necesar astfel ca întreruperea unui circuit aflat în sarcină să se obţină prin stingerea definitivă a arcului

electric de deconectare într-un timp scurt, înainte ca acesta să producă efecte ireversibile atât asupra elementelor constructive cu care vine în contact cât şi asupra stabilităţii instalaţiei care se deconectează. Rezultă astfel că proprietăţile şi metodele de stingere specifice arcului electric sunt de mare importanţă atât pentru proiectarea, construcţia şi exploatarea corespunzătoare a echipamentelor electrice de comutaţie, perfecţionarea continuă a tehnicilor comutaţiei de putere având la bază aprofundarea acestui proces.

2.1. Arcul electric de deconectare

Deconectarea dinamică a circuitelor parcurse de curent este însoţită de amorsarea, între contactele echipamentului de comutaţie, a unui arc electric prin coloana căruia curentul continuă să circule. Arcul electric de deconectare reprezintă o descărcare autonomă prin care spaţiul dintre contacte, în general electroizolant, devine bun conducător de electricitate, caracterizat prin densitate de curent şi conductivitate de valori mari, temperatură înaltă, presiune mai mare decât cea atmosferică şi gradient de potenţial (intensitate a câmpului electric) de valoare redusă. In Fig.2.1 este reprezentată caracteristica voltamper a unei descărcări în gaze, pe care poate fi localizată descărcarea prin arc electric. Descărcarea luminiscentă se produce pentru căderi de tensiune la catod de 200...250 V şi curenţi având intensit[illegible] de 10^{-5} ...10^{-1} A. La valori superioare

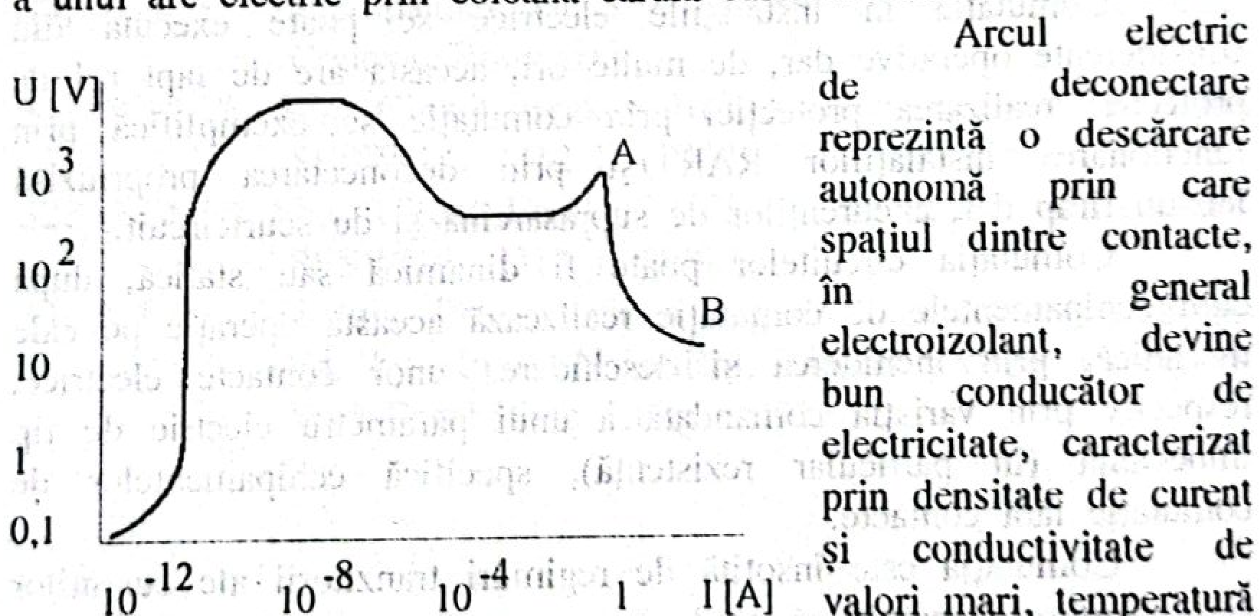


Fig.2.1.
Caracteristica voltamper a descărcării în gaze

ale intensităţii curentului, se obţine o zonă de trecere în care descărcarea are caracter instabil. Descărcării prin arc electric (segmentul AB) îi sunt proprii valori mari ale intensităţii curentului (1...10^5A), respectiv reduse pentru căderea de tensiune (10...20 V).

Descărcarea prin arc electric definită ca descărcare autonomă în gaz, se obţine atunci când nu mai este necesar un agent ionizant exterior, gradul de ionizare a gazului fiind suficient de înalt încât să permită formarea unei avalanşe de electroni şi ioni.

După cum se cunoaşte, în gaze pot exista următoarele tipuri de particule încărcate cu sarcină electrică:

-electroni, având sarcina electrică (-e) şi masa de repaus m_0;

-ioni pozitivi, rezultaţi prin pierdere de electroni, cu sarcini electrice (e), (2e) ş. a. m. d., de masă aproximativ egală cu cea a atomului;

-ioni negativi, produşi prin captare de electroni, având sarcini electrice (-e), (-2e) etc. şi masa corespunzătoare atomului.

Amorsarea arcului electric se produce în mod diferit, după cum aceasta are loc la străpungerea dielectrică a unui spaţiu gazos electroizolant, respectiv la întreruperea unui circuit aflat în sarcină, prin deschiderea contactelor echipamentului de comutaţie.

După cum se cunoaşte, în condiţii normale de temperatură şi presiune gazele sunt medii cu bune proprietăţi electroizolante. Simpla aplicare a unei diferenţe de potenţial între doi electrozi amplasaţi într-un gaz electroizolant nu va produce străpungerea acestuia. Amorsarea unei descărcări este posibilă numai dacă tensiunea aplicată depăşeşte o valoare critică u_d, numită tensiune disruptivă sau de amorsare.

Dacă sursa sau circuitul electrozilor nu limitează curentul, această descărcare iniţială degenerează în mod ireversibil în descărcare autonomă prin arc electric. Pentru ca descărcarea să devină autonomă este necesar ca tensiunea aplicată să atingă o valoare minimală, numită tensiune statică de străpungere, u_s. In general se consideră că $u_d \cong u_s$, cu excepţia descărcării corona, care este autonomă, dar de curent slab.

O descărcare se poate amorsa într-un câmp electric dacă în spaţiul dintre electrozi există electroni liberi, numiţi şi electroni primari. Aceştia se găsesc permanent în aerul atmosferic sau în alte

gaze, fiind produşi în număr de 10...20/cm^3.s [39], sub acţiunea razelor cosmice sau a radioactivităţii naturale. Ei pot de asemenea proveni din autoemisia electronică la catod, energia necesară părăsirii metalului fiind diminuată în prezenţa câmpului electric exterior, [18].

Electronii liberi, acceleraţi spre anod în câmpul electric imprimat, produc ionizări prin ciocniri cu particule neutre încât între electrozi se amorsează o descărcare prin arc. Aceasta este întreţinută prin creşterea în avalanşă a numărului de particule cu sarcină electrică din spaţiul disruptiv, atât pe seama emisiei termoelectronice la suprafaţa catodului, a cărui temperatură creşte rapid în timp, cât şi datorită ionizării termice în coloana arcului, ca urmare a creşterii temperaturii acesteia la valori de $5.10^3...10^4$ ^oK.

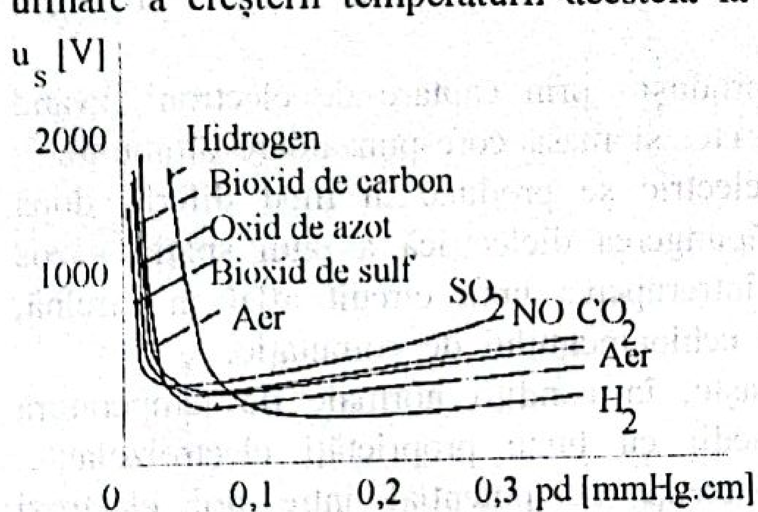


Fig.2.2
Curbele lui Paschen

Tensiunea de străpungere u_s este dată de legea lui Paschen conform căreia [18], în ipoteza unui câmp electric uniform, stabilit între doi electrozi situaţi la distanţa d într-un mediu gazos aflat la presiunea p, tensiunea de străpungere depinde numai de produsul (pd). Dependenţa u_s(pd) este dată prin curbele lui Paschen, utile în tehnica echipamentelor de comutaţie funcţionând cu mediu, izolant şi de stingere a arcului electric, gazos. Aceste curbe, determinate experimental pentru diferite gaze, sunt de forma dată în Fig.2.2. In construcţia echipamentelor de comutaţie se urmăreşte obţinerea unor valori cât mai mari pentru tensiunea de străpungere, atunci când distanţele de izolaţie şi presiunea de lucru a gazului sunt impuse. Cele două ramuri ale acestor curbe, situate de o parte şi de cealaltă a valorii minime a tensiunii de străpungere, ilustrează dezvoltarea după două direcţii a tehnicilor moderne în comutaţia de putere: comutaţia în gaze sub presiune, de exemplu în hexafluorură de sulf (pentru

valori mari ale produsului pd), respectiv comutaţia în vid avansat (pentru valori oricât de mici ale aceluiaşi produs).

Amorsarea arcului electric la întreruperea circuitelor funcţionând în sarcină este legată de fenomenele specifice contactelor electrice şi rezistenţei de contact.

La întreruperea curenţilor având intensităţi de valori mari, odată cu diminuarea forţei de apăsare în contact are loc scăderea numărului contactelor elementare (puncte de atingere), astfel încât densitatea de curent pe suprafaţa reală de contact creşte foarte mult. Aceasta conduce la topirea şi vaporizarea explozivă a ultimelor punţi metalice dintre piesele de contact, între care se formează o plasmă de mare conductivitate. Arcul electric se consideră amorsat între rămăşiţele punţilor de contact, imediat după explozia acestora şi este întreţinut în continuare datorită proceselor de ionizare produse prin emisie termoelectronică şi prin ciocniri între particule având energii cinetice de valori mari, ca urmare a temperaturii înalte din coloană.

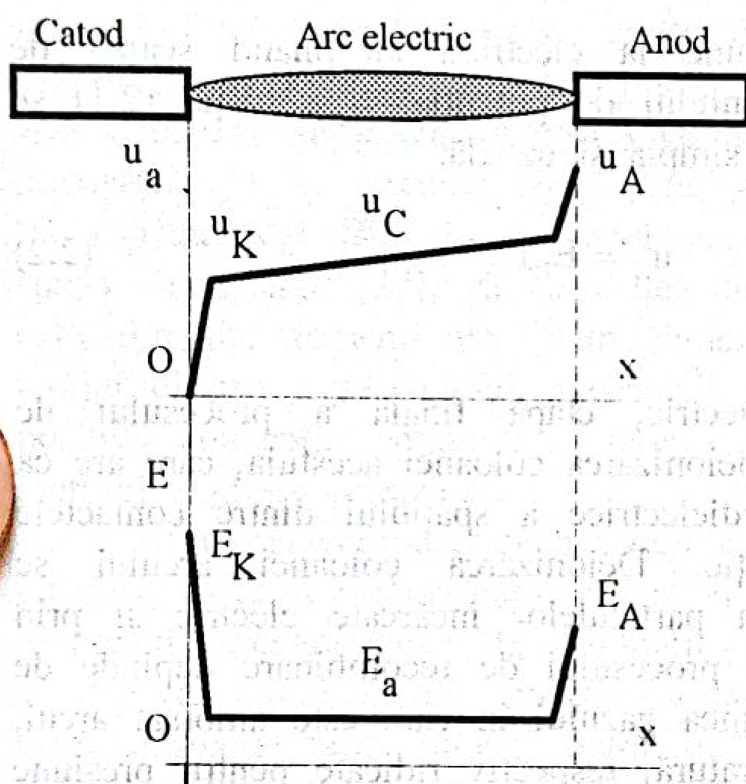


Fig.2.3
Distribuţia tensiunii şi a gradientului de potenţial

Distribuţia tensiunii şi a gradientului de potenţial în lungul coloanei unui arc electric cu ardere staţionară este dată în Fig.2.3. Rezultă că în vecinătatea catodului se produce o variaţie bruscă a tensiunii, numită cădere de tensiune catodică u_K, gradientul de potenţial corespunzător E_K având valori mari. In lungul coloanei arcului, tensiunea u_C variază aproape liniar, încât gradientul de potenţial poate fi considerat constant, de valoare E_a. La anod se

înregistrează de asemenea o variație bruscă a tensiunii, datorită căderii de tensiune anodică, u_A. Căderea de tensiune catodică, având valori de 10...20 V, poate fi considerată constantă pentru același mediu și același material al electrozilor. Căderea de tensiune anodică are valori dependente de intensitatea curentului prin arc. Conform Fig.2.3, tensiunea u_a a arcului electric se poate scrie sub forma:

$$u_a = u_K + u_C + u_A ; \tag{2.1}$$

neglijând căderile de tensiune la electrozi și ținând seama de caracterul constant al gradientului de potențial E_a, relația (2.1) se poate aduce la forma foarte simplă și uzuală:

$$u_a = E_a \ell, \tag{2.2}$$

ℓ fiind lungimea coloanei.

Stingerea arcului electric, etapă finală a procesului de deconectare, se obține prin deionizarea coloanei acestuia, care are ca urmare refacerea rigidității dielectrice a spațiului dintre contactele echipamentului de comutație. Deionizarea coloanei arcului se realizează prin recombinarea particulelor încărcate electric și prin difuzia acestora. Intensitatea procesului de recombinare depinde de natura, temperatura și presiunea gazului în care este amorsat arcul; valori scăzute pentru temperatură, respectiv ridicate pentru presiune și gradient de potențial, favorizează recombinarea. Deionizarea prin difuzie constă în împrăștierea particulelor încărcate electric în zone cât mai depărtate de spațiul de ardere a arcului, obținându-se astfel micșorarea conductivității coloanei.

2.2. Modelarea arcului electric

Considerat ca element de circuit, arcul electric are proprietăți de rezistor neliniar [26] deoarece dependența dintre tensiunea la borne și intensitatea curentului care îl traversează este

diferită de o dreaptă. Proprietățile sale fizice îl apropie de caracteristicile cerute întrerupătorului ideal și anume:

-prin mecanismele de deionizare, coloana arcului este susceptibilă de trecere rapidă din starea conductoare (plasmă) în cea de mediu electroizolant, cu posibilitatea dimensionării convenabile sub raportul ținutei dielectrice;

-tranziția între cele doua stări are loc la trecerea naturală prin zero a curentului și este foarte rapidă, grație inerției termoelectrice foarte mici a mediului ionizat.

Aceste caracteristici, care răspund aproape direct și în aparență foarte simplu unor cerințe funcționale ce vor să atingă idealul, sunt însă proprii unui proces fizic deosebit de complex, având mecanisme interne uneori greu de stăpânit, încât este practic imposibil de a predetermina prin modelare proprietățile unui întrerupător real fără a face apel la experiment. Mai mult, unii autori consideră [27], că "o astfel de situație este practic opusă celei din alte domenii ale electrotehnicii, unde o bună înțelegere a teoriei electromagnetismului, mecanicii, termodinamicii etc. ... face posibilă concepția optimală a unor structuri sau procese doar cu ajutorul studiilor teoretice".

Extrema complexitate a fizicii arcului electric de deconectare pe de o parte și costul foarte ridicat al încercărilor experimentale în domeniul echipamentelor de comutație, pe de alta parte, au condus la încercări multiple de modelare a acestui fenomen, concretizate prin existența unui număr mare de modele fie fizice, fie de conductanță (cutie neagră, black box, boîte noire).

Modelele fizice au în vedere reprezentarea mecanismelor care intervin în arderea arcului electric și vizează determinarea unor parametri ai acestuia în scopul optimizării construcției dispozitivelor de stingere. Aceste modele au la bază ecuațiile fundamentale ale fizicii (conservarea masei, a cantității de mișcare și a energiei) și sunt cu átât mai complexe cu cât se urmărește reprezentarea mai detaliată și mai precisă a fenomenului.

Dintre modelele fizice existente se citează cele ale lui Swanson-Roidt [31], Cowley-Chan-Fang, [11] precum și modelul Hermann-Ragaller, [16].

Modelul Swanson-Roidt consideră arcul electric drept o sursă termică amplasată într-un fluid cu curgere unidimensională de mare viteză și a fost utilizat pentru studiul influenței unor parametri specifici camerelor de stingere (natura mediului de stingere, presiunea acestuia, curentul de defect etc.), exercitate asupra funcționării întrerupătoarelor de putere la defect kilometric.

Modelul Cowley-Chan-Fang este bazat, ca și precedentul, pe tehnica utilizată în studiul straturilor limită și face posibilă investigarea arderii staționare a arcului electric într-un ajutaj, cu determinarea valorii critice a intensității curentului care conduce la blocarea ajutajului (fenomenul de refulare a arcului, cunoscut și ca efect de dop sau bușon).

In cazul modelului Hermann-Ragaller, arcul electric se consideră sub forma unei coloane cilindrice, la nivelul căreia bilanțul energetic are în vedere degajarea căldurii prin efect Joule și transmisia acesteia prin convecție, radiație și difuzie turbulentă. Procesele sunt localizate în trei zone concentrice: nucleul conductor, care determină parametrii electrici și în care distribuția radială a temperaturii se consideră de tip parabolic, un strat exterior, caracterizat prin curgerea gazului rece și un strat intermediar, necesar pentru descrierea difuziei turbulente, în care variația radială a temperaturii se acceptă ca fiind exponențială. Modelul permite studiul comportamentului arcului în interacțiune cu rețeaua și evidențierea influenței unor parametri asupra procesului.

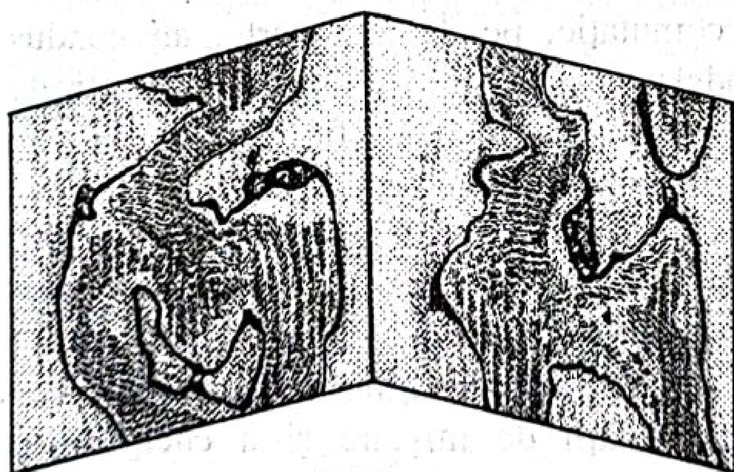


Fig.2.4
Turbulența coloanei arcului în SF_6

Din punct de vedere geometric și dinamic, arcul electric amorsat între contactele unui întrerupător este departe de a fi o coloană cilindrică, fixată între doi electrozi. Modele sofisticate [9], [10], [37], iau în calcul fluctuațiile turbulente ale coloanei arcului în condițiile mișcării tranzitorii și

tridimensionale ale acesteia, produse sub acţiunea forţelor de tip Lorentz şi a curgerii mediului de stingere.

In Fig.2.4 se prezintă rezultatul modelării tridimensionale a turbulenţei coloanei unui arc electric amorsat în hexafluorură de sulf şi traversat de un curent cu intensitatea de 1000 A, [12].

Modelele fizice, axate pe descrierea fenomenelor care coexistă în procesul foarte complex numit descărcare prin arc electric, sunt utilizate cu deosebire în etapele iniţiale, de concepţie şi cercetare a unui nou echipament de comutaţie; pe parcursul dezvoltării noii concepţii, aceste modele permit analiza comportării aparatului, cu evidenţierea solicitărilor fundamentale critice.

Utilizarea acestor modele presupune o strânsă corelare a simulării pe calculator cu încercările experimentale, fiind posibil astfel studiul detaliat şi caracterizat prin fidelitate al impactului parametrilor interni ai aparatului, de naturi diferite, asupra comportamentului acestuia în condiţiile impuse de exploatare.

Corespunzător modelelor de conductanţă, arcul electric este considerat un dipol rezistiv neliniar, modelul reprezentând de fapt, sub formă analitică sau nu, caracteristica voltamper a acestuia.

Se pune în evidenţă în acest fel comportamentul electric macroscopic al unui aparat cu comutaţie dinamică, fiind posibile racordarea şi studiul funcţionării acestuia într-un circuit electric; modelele de tip cutie neagră permit simularea interacţiunii dintre aparatul de comutaţie şi reţeaua în care acesta este inserat, proces care interesează în mod deosebit serviciile de exploatare.

Multe din modelele de conductanţă existente sunt exprimate printr-o ecuaţie diferenţială de ordinul întâi care, pentru o lungime constantă a coloanei arcului, poate fi considerată sub forma generalizată [38]:

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt}=\frac{1}{T_a(|i|,G)}\left[\frac{u_a i}{p(|i|,G)}-1\right], \qquad (2.3)$$

unde G reprezintă conductanţa arcului, u_a, i-tensiunea de arc respectiv intensitatea curentului care parcurge coloana, $T_a(|i|, G)$-constanta de timp a arcului electric, $p(|i|,G)$-puterea cedată mediului

sub formă de caldură în unitatea de timp; drept parametri independenţi se consideră mărimile T_a şi p.

Modelele de conductanţă diferă în principal prin expresiile adoptate pentru funcţiile $T_a(|i|, G)$, respectiv $p(|i|, G)$.

2.2.1. Modelele Mayr şi Cassie

Cele mai simple modele de conductanţă, caracterizate doar prin doi parametri independenţi, sunt cele imaginate de O. Mayr, respectiv A. M. Cassie.

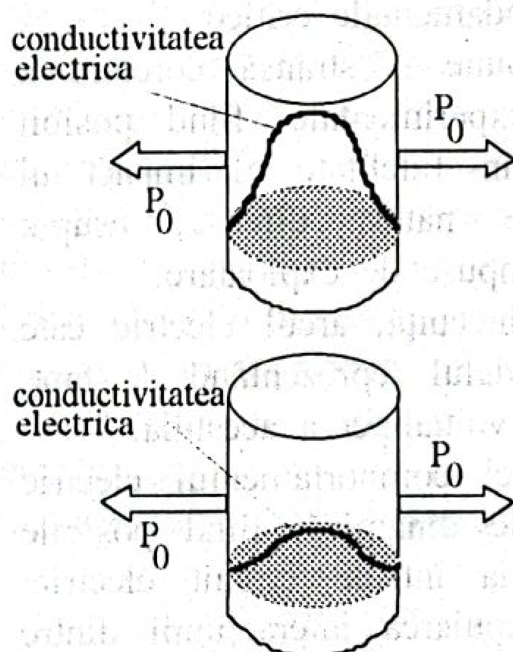


Fig.2.5
Modelul Mayr

Modelul elaborat de O. Mayr [21], reprezintă prototipul unei întregi familii a modelelor de conductanţă, premizele acestuia constând într-un număr limitat de ipoteze simple şi acceptabile sub raport fizic.

Astfel, arcul electric este considerat ca fiind o coloană cilindrică de diametru constant, din care căldura produsă prin efect electrocaloric este evacuată pe direcţie radială exclusiv prin conducţie termică, Fig.2.5; puterea cedată mediului sub formă de căldură în unitatea de timp de lungimea unitară a coloanei arcului, se consideră constantă, P_0.

Conductivitatea electrică σ depinde de raza r a coloanei cilindrice după o funcţie de tipul $\exp(-r^2)$, verificând astfel cu o bună aproximaţie ecuaţia Elenbaas Heller, pentru valori constante ale conductivităţii termice λ, [13].

In aceste ipoteze, arcul electric de curent alternativ, considerat de lungime unitară şi ca proces cvasistaţionar, Fig.2.6, este caracterizat printr-o ecuaţie de bilanţ al puterilor având expresia:

$$E_a i = P_0 + \frac{dQ}{dt}, \tag{2.4}$$

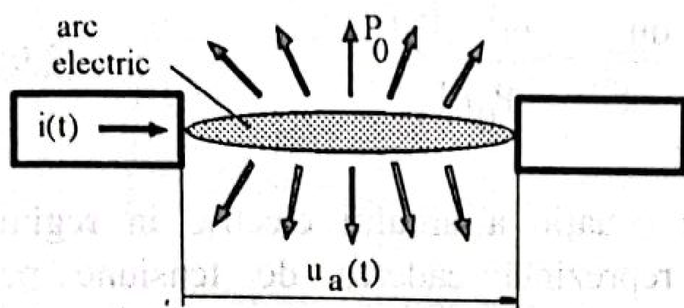


Fig.2.6
Bilanțul de puteri la nivelul coloanei arcului

unde E_a, i reprezintă gradientul de potențial, respectiv curentul, P_0-puterea disipată, iar Q-căldura acumulată în volumul coloanei.

Conductanța arcului depinde univoc de gradul de ionizare a gazului, deci de cantitatea de căldură conținută în volumul acestuia încât, conform ipotezei avansate de Mayr [27], [39], [41], dependența conductanței G, raportată la unitatea de lungime a coloanei, în raport cu conținutul Q de energie se poate exprima printr-o relație de forma:

$$G = Ke^{\frac{Q}{Q_0}}, \tag{2.5}$$

unde K și Q_0 sunt constante.

Ținând seama de (2.4), relația (2.5) conduce la ecuația:

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt} = \frac{1}{T_a}\left(\frac{E_a i}{P_0} - 1\right), \tag{2.6}$$

unde:

$$T_a = \frac{Q_0}{P_0} \tag{2.7}$$

reprezintă constanta de timp a arcului electric.
Deoarece:

$$G = \frac{i}{E_a}, \tag{2.8}$$

pentru o lungime constantă a coloanei arcului, ecuația diferențială (2.6) se scrie sub forma:

$$\frac{1}{i}\frac{di}{dt}-\frac{1}{u_a}\frac{du_a}{dt}=\frac{u_a i - P_0\ell}{P_0\ell T_a}, \qquad (2.9)$$

cunoscută şi sub denumirea de ecuaţie a arcului electric în regim dinamic; în relaţia (2.9) u_a reprezintă căderea de tensiune pe coloana arcului de lungime constantă ℓ. Modelul Mayr conţine doi parametri independenţi, P_0 şi T_a, care trebuie determinaţi pe cale experimentală.

Considerând că intensitatea curentului prin arc este sinusoidală:

$$i(t)=\sqrt{2}\,I\sin\omega t, \qquad (2.10)$$

pentru soluţia ecuaţiei diferenţiale (2.9) se obţine expresia, [18]:

$$u_a(t)=\frac{\sqrt{2}\,P_0\ell\sin\omega t}{I\left[1-\frac{\sin(2\omega t+\varphi)}{\sqrt{1+(2\omega T_a)^2}}\right]}, \qquad (2.11)$$

unde:

$$\varphi=arcctg(2\omega T_a). \qquad (2.12)$$

In Fig.2.7 sunt reprezentate curbele $u_a(t)$ date de relaţia (2.11), pentru diferite valori atribuite produsului (ωT_a). Se evidenţiază astfel că pentru $(\omega T_a)\to 0$ se obţin caracteristici apropiate de cele ale arcului electric de curent continuu, unde valorilor mari ale curentului le corespund tensiuni de arc de valori mici; pentru $(\omega T_a)\to\infty$ tensiunea $u_a(t)$ se apropie de o sinusoidă.

Eliminând variabila timp între relaţiile (2.10), (2.11), pentru caracteristica voltamper dinamică a arcului electric, se obţine curba tipică, reprezentată în Fig.2.8.

Ţinând seama de relaţiile (2.4), (2.5), (2.8), constanta de timp T_a a arcului electric se defineşte ca fiind durata în care

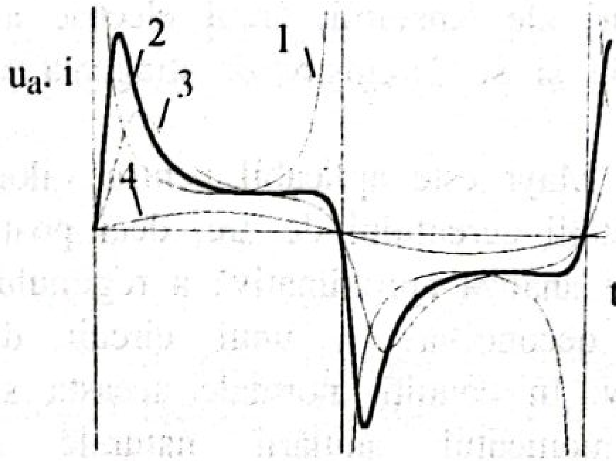


Fig.2.7

Tensiunea și curentul de arc: 1-$\omega T_a=0$; 2-$\omega T_a=0,25$; 3-$\omega T_a=0.5$; 4-i(t).

conductanța G scade de e ≅ 2,718 ori, după anularea puterii furnizate arcului de rețeaua de alimentare (i = 0). Valorile sale introduc în calcul efectul de inerție termică a mediului de stingere, care se traduce prin intârzierea răspunsului mărimilor termice la modificarea unor mărimi de altă natură, în particular electrică. In aceleași condiții, constantele Q_0, K reprezintă conținutul de energie al plasmei în momentul anulării intensității curentului, respectiv conductanța electrică a arcului după o durată T_a, considerată din momentul trecerii prin zero a curentului.

Valorile constantei de timp T_a, care la întrerupătoarele moderne de înaltă tensiune sunt de ordinul microsecundei, au o importanță hotărâtoare în procesul stingerii arcului electric de curent alternativ. Astfel, pentru o valoare dată a pulsației ω, atât din relația (2.11) cât și din Fig.2.7, 2.8, rezultă că pentru reamorsarea arcului electric la începutul fiecărei semiperioade sunt necesare tensiuni de arc cu atât mai mari cu cât constanta de timp are valori mai mici; aceasta înseamnă, conform relațiilor (2.5), (2.8) că, după anularea intensității curentului, puterea P_0, evacuată sub formă de căldură în unitatea de timp din coloana arcului, are valori mari și conductanța scade rapid în timp. In aceste condiții, dacă sursa de alimentare a rețelei nu asigură nivele

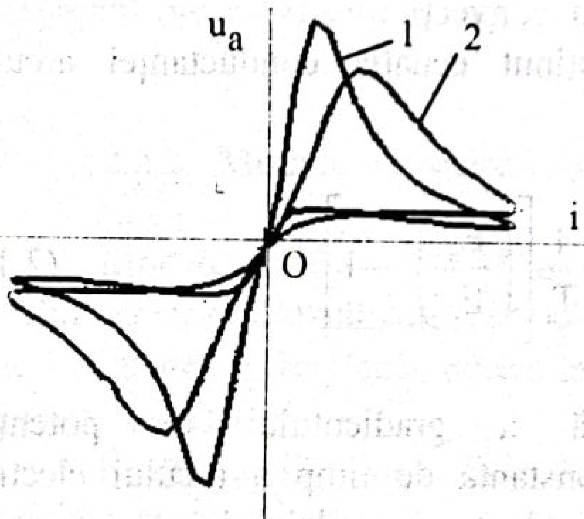


Fig.2.8

Caracteristicile arcului electric de curent alternativ: 1-$\omega T_a=0,25$; 2-$\omega T_a=0,5$.

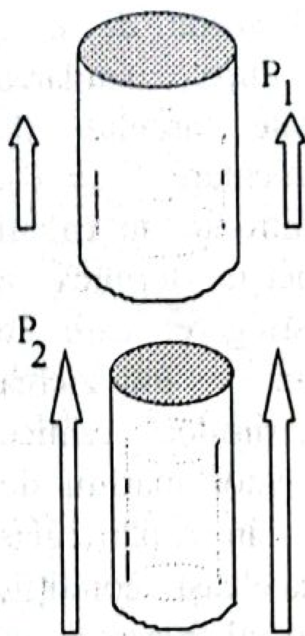


Fig.2.9
Modelul Cassie

suficient de mari ale tensiunii, arcul electric nu se mai reaprinde și se înregistrează stingerea sa definitivă.

Modelul Mayr este aplicabil pentru valori mici ale intensității curentului de arc, deci poate fi utilizat pentru analiza aproximativă a regimului tranzitoriu de deconectare a unui circuit de curent alternativ. In condiții normale aceasta se produce în momentul anulării naturale a intensității curentului, prin stingerea definitivă a arcului electric.

Modelarea arcului electric propusă de A. M. Cassie are la bază ipoteza unei coloane cilindrice, în volumul căreia temperatura, pierderile specifice prin efect electrocaloric, căldura specifică și conductivitatea electrică sunt mărimi constante, iar cedarea spre exterior a căldurii degajate în coloana arcului are loc numai prin convecție.

A. M. Cassie [7], a obținut ecuația conductanței arcului electric de forma:

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt} = \frac{1}{T_a}\left[\left(\frac{E_a}{E_0}\right)^2 - 1\right], \tag{2.13}$$

unde E_0-valoarea de referință a gradientului de potențial (independentă de curent) și T_a-constanta de timp a arcului electric, reprezintă cei doi parametri independenți ai modelului.

Potrivit acestui model, se consideră că gradul de ionizare a gazului este suficient de înalt, încât variația conductanței este atribuită modificării secțiunii transversale a coloanei, Fig.2.9.

Conductanța, puterea cedată mediului prin convecție sub formă de căldură în unitatea de timp și cantitatea de căldură acumulată în coloana arcului sunt proporționale fiecare cu secțiunea transversală a acesteia, [41]:

$$G = K_1 P = K_2 Q = K_3 s, \tag{2.14}$$

K_1, K_2 și K_3 fiind constante. Constanta de timp termică a arcului este definită prin relația:

$$T_a = \frac{Q}{P} = \text{const}. \qquad (2.15)$$

In regim permanent, căldura degajată în coloana arcului este integral cedată mediului, încât se poate scrie:

$$GE_0^2 = P. \qquad (2.16)$$

Modelul Cassie poate fi utilizat în analiza regimurilor caracterizate printr-un înalt grad de ionizare a mediului, deci când coloana arcului este traversată de curenți de mare intensitate; datorită ipotezei privind uniformitatea temperaturii în volumul coloanei arcului rezultatele sunt, de cele mai multe ori, departe de a fi verificate în realitate.

2.2.2. Modele de conductanță evoluate

Modelele Mayr si Cassie descriu calitativ comportarea arcului electric. Rezultatele obținute pe cale experimentală diferă de cele calculate, astfel încât determinările cantitative au o marjă destul de mare de eroare.

Pentru a fi aduse mai aproape de realitatea experimentală, modelele cutie neagră au fost modificate, intervențiile operate asupra lor fiind de două tipuri: crearea unor modele cu mai mult de doi parametri independenți și considerarea parametrilor din modelele tradiționale ca funcții de alte mărimi electrice (conductanța arcului, respectiv intensitatea curentului).

In Tab.2.1. sunt prezentate principalele modele de conductanță evoluate [38], exprimate prin ecuația diferențială a conductanței G a arcului electric, la care se adaugă parametrii care, având valori independente, permit obținerea unei mai bune apropieri între teorie și experiment.

Tab.2.1

$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt}=$	Parametrii	Nr. rel.
$\frac{1}{T_a}\left(\frac{u_a i}{P_0}-1\right)+\beta\frac{du_a}{dt}$	T_a, P_0, β	2.17
$\frac{1}{T_a}\left(\frac{u_a i - P_0}{e^2 G}-1\right)\left[1-\left(\frac{u_a}{U_d}\right)^2-\frac{T_a}{U_d^2}\left(\frac{du^2}{dt}\right)\right]$	T_a, P_0, e, U_d	2.18
$\frac{1}{T}\left(\frac{u_a i}{P_0+U_0\lvert i\rvert}-1\right); T=T_a+\frac{T_1}{1+\left(\frac{G}{G_0}\right)^2}$	T_a, P_0, G_0, T_1, U_0	2.19
$\frac{1}{T_a}\left(\frac{u_a i}{a+b\lvert i\rvert+c\sqrt{\lvert i\rvert}}-1\right)$	T_a, a, b, c	2.20
$\frac{1}{T_a(\lvert i\rvert)}\left[\frac{G_s(\lvert i\rvert)}{G}-1\right]$	$T_a(\lvert i\rvert), G_s(\lvert i\rvert)$	2.21
$\frac{1}{T_a(G)}\left[\frac{u_a i}{P(G)}-1\right]$	$T_a(G)$, $P(G)$	2.22
$\frac{1}{T_a(G)}\left[\frac{G_s(\lvert i\rvert)}{G}-1\right]$	$T_a(G), G_s(\lvert i\rvert)$	2.23
$\frac{1}{T_a(G)}\left[\frac{u_a i}{P(G)}-\gamma(t,G)\right]$	$T_a(G)$, $P(G)$, $\gamma(t, G)$	2.24
$\frac{1}{T_a(G,t)}\left[\frac{u_a i}{P(G,t)}-1\right]$	$T_a(G,t)=\overline{T}_a[1+\xi_T(G,t)]$ $P(G,t)=\overline{P}[1+\xi_P(G,t)]$	2.25
$\frac{1}{T_a}\left[\left\lvert\frac{u_a\lvert i\rvert^{\alpha}}{k}\right\rvert^{\frac{2}{1+\alpha}}-X(t)\right]$	α, k, T_a, $X(t)=1+\xi_\chi(t)$	2.26

Astfel, modelul Rieder și Urbanek de forma (2.17), ține seama de efectele de dezechilibru produse de câmpul electric intens, imprimat coloanei arcului după trecerea prin zero a intensității curentului, sub acțiunea tensiunii tranzitorii de restabilire, [25].

Urbanek [33], include drept parametru în modelul (2.18) tensiunea de străpungere a spațiului dintre contacte, U_d. Pentru a descrie reamorsarea termică, tensiunea de arc se consideră $u_a \ll U_d$ și ecuația (2.18) se rescrie sub forma (2.22), cu parametrii T_a, P considerați drept funcții de conductanța arcului.

Alte funcții pentru parametrii T_a, P sunt propuse de Kopplin și Schwalb, [38]; modelul corespunzător are expresia (2.19), fiind caracterizat prin cinci parametri constanți. Variante ale acestui model au fost utilizate cu valori constante atribuite parametrului T_a; o astfel de variantă are expresia (2.20).

O altă cale de creștere a preciziei modelelor de conductanță constă în a atașa parametrilor, considerați inițial cu valori constante, funcții în care variabilele sunt intensitatea curentului de arc, respectiv conductanța arcului. Aceste concepte au fost dezvoltate de Hochrainer, Grütz [15] și Schwarz [28], care au formulat și utilizat modele de forma (2.21), (2.22). Arcul este caracterizat prin parametrii T_a (temporal) și G_s (conductanța statică, obtinută pentru curent constant), dependenți de intensitatea curentului, respectiv de conductanța G a arcului. O combinație a acestor două modele [38], este cel reprezentat prin ecuația (2.23).

Prin modificarea ecuației (2.22) s-a obținut modelul (2.24), care introduce un parametru suplimentar pentru a caracteriza influența proceselor care au loc la curent de mare intensitate, asupra comportării ulterioare a arcului, la trecerea prin zero a intensității curentului.

Modelele (2.17)...(2.24) sunt de tip determinist, regimul de ardere a arcului electric obținându-se prin calcul și fiind strict determinat de parametrii de intrare. Prin natura sa, arcul electric poate fi însă considerat și ca proces stochastic, proprietățile acestuia fiind evidențiate prin calcule repetate, cu date de intrare obținute dintr-un număr oricât de mare de teste efectuate în aceleași condiții. In baza acestor considerații [29], Sporckmann a propus modelul

(2.25), în care comportarea stochastică a arcului electric este considerată prin factorii $\xi_T(G,t)$, $\xi_P(G,t)$, cu valori principale nule.

Legros și Genon [19], utilizează în modelul (2.26) variabila aleatoare $\xi_\chi(t)$, având valoarea principală unitară și exprimând dispersia căldurii cedate mediului în unitatea de timp.

In publicații de dată recentă se constată un interes sporit pentru modele cu mai mulți parametri independenți sau având mărimile caracteristice exprimate în unități relative, [8]; acestea au în general un caracter predictiv mai puternic, fără a introduce suplimentar dificultăți semnificative în utilizare.

T. E. Browne, elaborând primul model hibrid Cassie-Mayr [6], consideră că procesele semnificative pentru un arc electric de deconectare au loc în două intervale de timp succesive. Primul, înregistrat înainte de momentul anulării intensității curentului, este susceptibil de a fi modelat pe baza teoriei lui Cassie, celui de al doilea, în care are loc regimul tranzitoriu de restabilire a tensiunii între contacte, aplicându-i-se teoria lui Mayr.

H. Thiel [32], a propus funcții de aproximare pentru parametrii modelului Mayr de forma:

$$P = P_1\left(\frac{G}{G_1}\right)^a, \quad T_a = T_1\left(\frac{G}{G_1}\right)^b, \tag{2.27}$$

unde a și b sunt constante dependente de mediul de stingere; pentru hexafluorură de sulf se consideră a=0,9 și b=0,7.

Y. Nakamishi si D. T. Tuma [22], [39], considerând coloana arcului în echilibru termodinamic local, la presiune constantă și în ipoteza unui câmp electric uniform distribuit în secțiunea transversală a coloanei, au obținut un model analitic de forma:

$$\frac{dG}{dt} = A_1 G^{1+n\gamma} + A_2 G^{n(\gamma-1)} i^2, \tag{2.28}$$

parametrii A_1, A_2, n și γ fiind constante dependente de proprietățile fizice ale mediului de stingere.

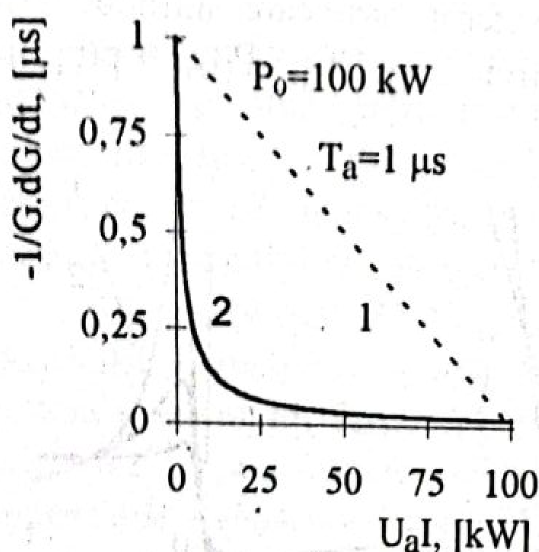


Fig.2.10

Funcția de conductanță a arcului electric: 1-modelul Mayr; 2-curbă măsurată (Kema-Olanda).

Interesantă este și tratarea prin metode statistice a modelării arcului electric. In [24] se arată că un model cu două constante de timp, rezultat ca urmare a interpretării pe baze statistice a comportării arcului electric, permite simularea cu acuratețe mărită a funcționării în diferite condiții a echipamentului de comutație în aer sau hexafluorură de sulf.

Plecând de la constatarea că pentru arcul electric rotativ, amorsat la deconectare într-un întrerupător de medie tensiune cu hexafluorură de sulf, rezultatele experimentale (Fig.2.10) se depărtează de cele corespunzătoare modelului Mayr exprimat prin relația (2.6), specialiștii laboratoarelor Kema din Olanda au conceput și utilizat un nou model constituit din ecuații diferite [34], [35], atașate arcului electric înainte și după trecerea prin zero a intensității curentului.

Acceptând ideea că transferul termic la nivelul coloanei arcului se produce simultan atât prin conducție cât și prin convecție, în [2], [4] a fost propus un model compozit caracterizat prin patru parametri independenți, care permite reglarea evoluției în timp a conductanței în funcție de valorile momentane ale intensității curentului. Potrivit modelului, schema electrică echivalentă a conductanței arcului este prezentată în Fig.2.11a, unde cu G_C, G_M s-au notat conductanțele corespunzătoare respectiv modelelor Cassie și Mayr, cursoarele k_1, k_2 simulând selecția conductanței în cazul modelului propus. Deplasarea acestora este sincronizată cu valorile intensității curentului de arc, încât conductanța rezultantă poate fi scrisă sub forma generală:

$$G_{CM}(t) = C(t)G_C(t) + M(t)G_M(t), \qquad (2.29)$$

unde $C(t)$, $M(t)$ sunt două funcții de sincronizare care introduc un parametru suplimentar, pe lângă cei trei (U_0, T_a, P_0), proprii modelelor Cassie și Mayr.

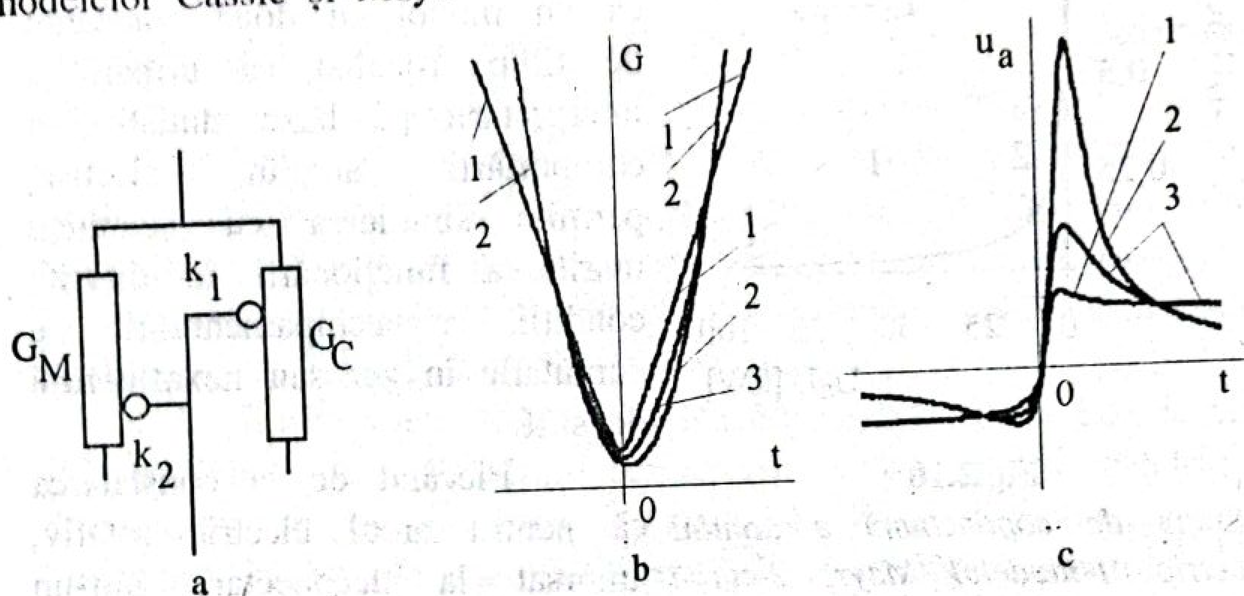


Fig.2.11

Modelele Cassie, Mayr și compozit (Cassie-Mayr): a-schema echivalentă; b-conductanța arcului electric; c-tensiunile de arc; 1-modelul Cassie; 2-modelul Mayr; 3-modelul compozit.

Așa cum se arată în [3], prin intermediul acestui parametru conductanța rezultantă (2.29) poate lua valori, la trecerea prin zero a curentului, între curbele $G_C(t)$, $G_M(t)$. Pentru valori mari ale intensității curentului, se ia în calcul conductanța $G_C(t)$. Rezultatele acestei simulări sunt prezentate sub formă grafică în Fig.2.11b, c.

2.2.3. Stingerea arcului electric de curent alternativ

Stingerea arcului electric de curent alternativ este facilitată de anularea periodică a intensității curentului, în momentele căreia deionizarea coloanei este maximă. Procesele sunt diferite, după cum au loc la stingerea arcului electric lung (de înaltă tensiune), respectiv scurt (de joasă tensiune).

În procesul stingerii arcului electric lung, amorsat între contactele echipamentelor de comutație de înaltă tensiune, intervin atât unii parametri ai circuitului deconectat (tensiunea tranzitorie de

restabilire care produce solicitarea dielectrică în întrerupător și intensitatea curentului, care solicită termic întrerupătorul) cât și parametrii specifici întrerupătorului (tensiunea de străpungere în camera de stingere, care exprimă viteza de restabilire a rigidității dielectrice și tensiunea arcului electric, dependentă de gradul de răcire și de mediul de stingere).

In intervalele de timp scurte, conținând momentele anulării intensității curentului, temperatura coloanei arcului și conductanța acesteia scad rapid, înregistrându-se procesul de refacere a rigidității dielectrice. Ca urmare, spațiul dintre contacte își recapătă proprietățile electroizolante pierdute în urma amorsării arcului electric, procesul caracterizîndu-se prin creșterea rapidă atât a rezistenței electrice cât și a tensiunii de străpungere a acestui spațiu.

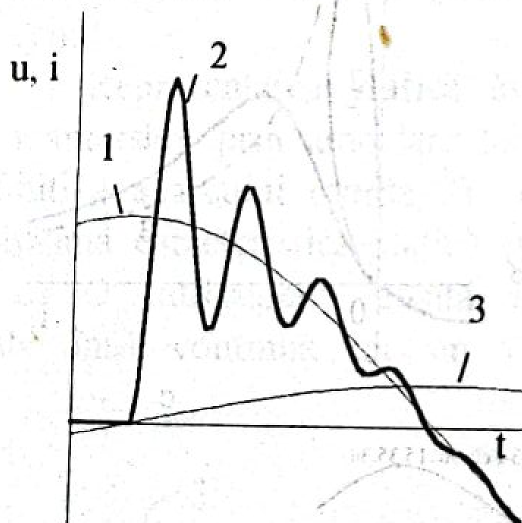


Fig.2.12

Regimul tranzitoriu de deconectare: 1-tensiunea sursei de alimentare; 2-tensiunea tranzitorie de restabilire; 3-intensitatea curentului.

In momentele anulării intensității curentului, când are loc practic stingerea periodică a arcului electric de curent alternativ, spațiului dintre contactele echipamentului de comutație i se aplică tensiunea tranzitorie de restabilire. Aceasta este constituită din tensiunea de frecvență industrială a sursei de alimentare având pulsația ω, peste care se suprapune componenta de regim liber a circuitului deconectat, de pulsație $\omega_e > \omega$.

Stingerea definitivă a arcului electric de curent alternativ se obține în acel moment al anulării, în mod obișnuit naturale a intensității curentului, corespunzător căruia tensiunea tranzitorie de restabilire are o viteză de creștere suficient de mică încât să nu mai poată produce reamorsarea arcului electric nici prin ambalare termică, nici prin străpungere termodielectrică. Aceste considerații se referă la cazurile obișnuite de deconectare dinamică

în instalaţiile de curent alternativ, corespunzătoare fie regimurilor normale de sarcină, fie celor de scurtcircuit la bornele întrerupătorului, aşa cum s-a arătat în §1.3. In majoritatea cazurilor, curenţii de scurtcircuit sunt practic inductivi, deoarece parametrii liniilor electrice respectă inegalitatea $L\omega >> R$.

În Fig.2.12, drept origine a timpului (t=0) este considerat momentul unei anulări a intensităţii curentului de scurtcircuit, căruia îi corespunde cu aproximatie valoarea de vârf a tensiunii de frecvenţă industrială a sursei de alimentare, curba 1; curba 2 reprezintă tensiunea tranzitorie de restabilire $u_r(t)$ obţinută, aşa cum s-a menţionat, ca sumă a tensiunii 1 cu cea corespunzătoare regimului liber oscilant al circuitului RLC (Fig.1.8).

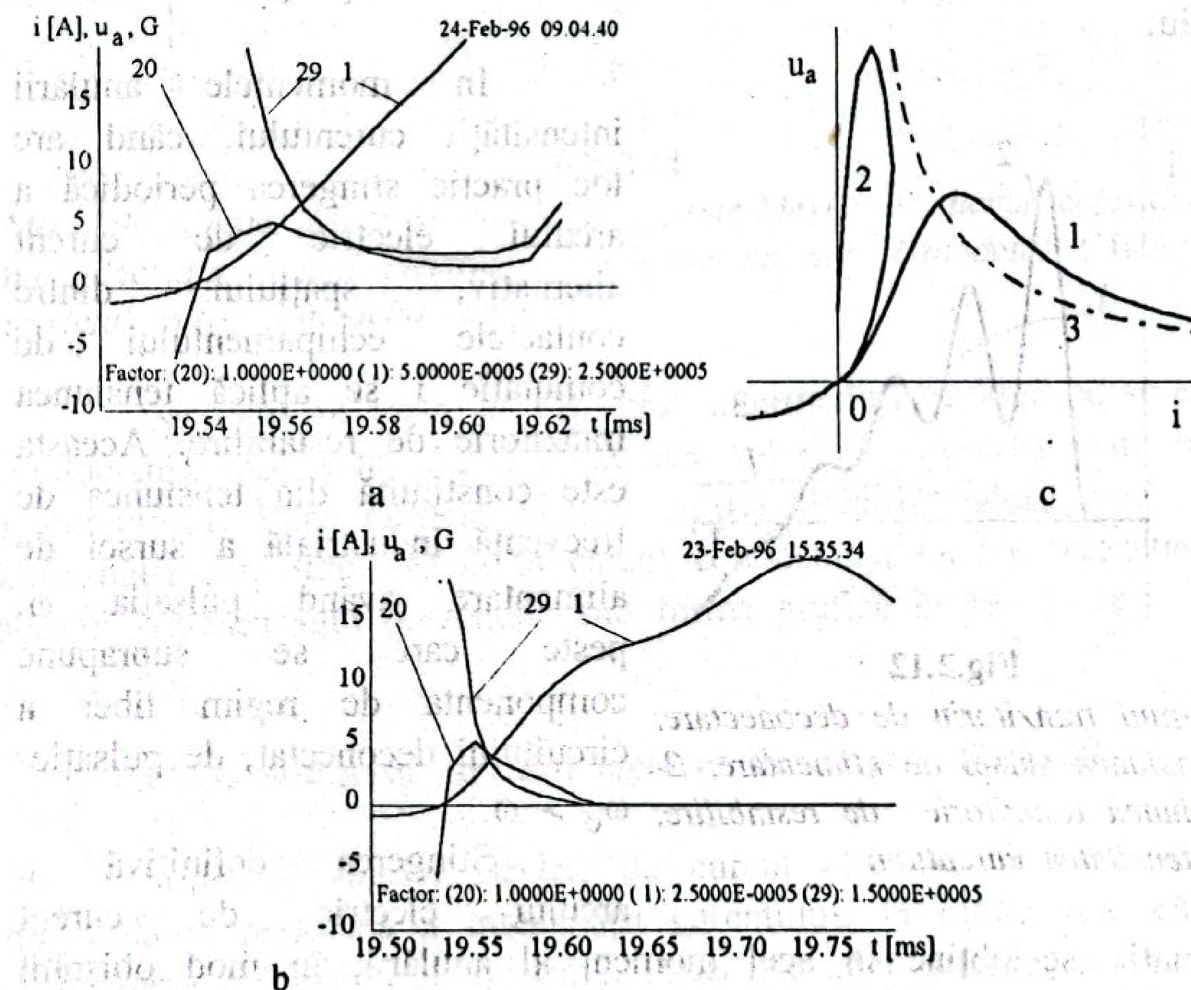


Fig.2.13

Fenomene la anularea curentului: a-reamorsare termică: 1-tensiunea de arc; 20-intensitatea curentului; 29-conductanţa arcului; b-stingerea definitivă: 1-tensiunea de restabilire; c-analiza în coordonate voltamper: 1-reamorsare termică; 2-stingere definitivă; 3-caracteristica statică.

Analiza în coordonate voltamper a ecuaţiei (2.4), de bilanţ al puterilor în coloana arcului electric, evidenţiază faptul că pentru puncte de funcţionare în care se verifică inegalitatea $E_a i > P_0$, se obţine $dQ/dt > 0$; în aceste condiţii are loc efectul de ambalare termică în coloana arcului, care duce inevitabil la reamorsarea sa.

Unele rezultate obţinute în modelarea arcului electric şi a fenomenelor de deconectare, efectuată cu ajutorul EMT Program, sunt prezentate în Fig.2.13, [4]. Evoluţia în timp a mărimilor caracteristice acestui proces, reprezentate grafic în jurul momentului trecerii naturale prin zero a intensităţii curentului, este dată în Fig.2.13a. Dacă evacuarea căldurii are loc cu mare intensitate, procesele deionizante produc scăderea rapidă a conductanţei G(t), Fig.2.13b, ajungându-se la stingerea definitivă a arcului electric, deci la întreruperea circuitului. Aceasta este posibilă numai dacă densitatea electronilor în plasma reziduală scade sub valoarea de $10^9/cm^3$.

Reprezentarea grafică în coordonate voltamper a proceselor de reamorsare prin ambalare termică (curba 1), respectiv de stingere definitivă a arcului (curba 2) este dată în Fig.2.13c, unde curba 3 reprezintă caracteristica statică ($u_a i = P_0 \ell$).

O întrerupere reuşită iniţial din punct de vedere termic poate însă continua cu un eşec termodielectric, dacă tensiunea

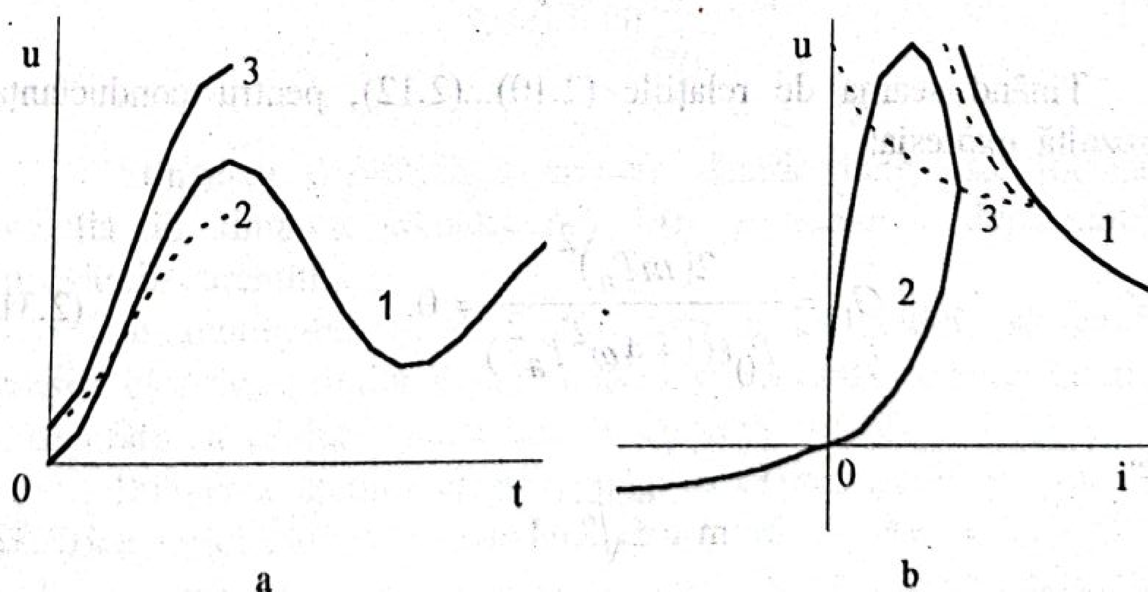


Fig..2.14

Stingerea definitivă a arcului electric şi eşecul termodielectric: a-evoluţia temporală; b-caracteristici voltamper.

tranzitorie de restabilire depăşeşte tensiunea de străpungere $u_S(t)$ în camera de stingere; creşterea acesteia caracterizează procesul de refacere a rigidităţii dielectrice a spaţiului dintre contacte.

În Fig.2.14a, curba 1 reprezintă tensiunea tranzitorie de restabilire $u_r(t)$, iar curbele 2 şi 3, de variaţie în timp a tensiunii de străpungere, corespund unei reamorsări termodielectrice a arcului electric, respectiv stingerii sale definitive.

In coordonate voltamper, Fig.2.14b, curba 1 reprezintă caracteristica statică, 2-tensiunea de străpungere, iar 3, 4-caracteristci corespunzătoare eşecului termodielectric respectiv stingerii definitive a arcului, [23].

Studiind procesele care au loc în jurul momentului anulării intensităţii curentului de arc, se pot stabili condiţii cantitative privind stingerea arcului electric de curent alternativ:

Datorită inerţiei termice, conductanţa arcului, calculată în momentele anulării intensităţii curentului, are valori nenule. Intr-adevăr, notând aceste valori cu G_0, se poate scrie:

$$G_0 = \frac{\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0}}{\left.\frac{du_a}{dt}\right|_{t=0}}. \tag{2.30}$$

Tinând seama de relaţiile (2.10)...(2.12), pentru conductanţa G_0 rezultă expresia:

$$G_0 = \frac{2(mT_a)^2}{P_0\ell(1+4\omega^2 T_a^2)} \neq 0, \tag{2.31}$$

unde:

$$m = \pm\sqrt{2}\,\omega I \tag{2.32}$$

reprezintă panta intensităţii i(t) a curentului în momentele anulării acestuia.

Dacă se apelează la definiţia dată în § 2.2.1 constantei de timp T_a a arcului electric, pentru conductanţa G(t) se poate scrie expresia:

$$G(t) = G_0 e^{-\frac{t}{T_a}}, \qquad (2.33)$$

valabilă pentru un interval de timp scurt, începând cu momentul anulării intensităţii curentului.

Pentru ca tensiunea tranzitorie de restabilire $u_r(t)$, aplicată spaţiului dintre contacte, să nu producă reamorsarea arcului electric este necesar ca puterea introdusă în coloană să aibă valori inferioare puterii P_0, disipate de aceasta:

$$G(t) u_r^2(t) < P_0 \ell^2, \qquad (2.34)$$

ℓ fiind lungimea coloanei.

Astfel, ţinând seama de (2.33), (2.34), condiţia necesară pentru stingerea arcului electric de curent alternativ se poate scrie sub forma, [18]:

$$u_r(t) < \ell \sqrt{\frac{P_0}{G_0} e^{\frac{t}{T_a}}}. \qquad (2.35)$$

Stingerea definitivă a arcului electric lung este dictată de evoluţia în timp a conductanţei G(t) a acestuia, după anularea intensităţii curentului.

In momentul trecerii prin zero a curentului, se anulează puterea electrică primită de la sursă, dar continuă cedarea în mediul înconjurător a căldurii acumulate în coloana arcului.

Stingerea arcului electric lung se obţine astfel pe calea unei puternice deionizări a coloanei acestuia, ca urmare a evacuării în mediul înconjurător, în vecinătatea momentelor anulării periodice a curentului, a unei cantităţi cât mai mari de căldură.

Un rol important în stingerea arcului electric lung îl are constanta sa de timp. Corespunzător relației (2.31), pentru valori mici ale constantei de timp T_a, rezultă valori de asemenea mici ale conductanței G_0, deci condiții bune pentru o stingere definitivă reușită.

Aceeași concluzie se obține și în baza relației (2.35), valorile mici ale constantei de timp T_a conducând la valori ridicate ale tensiunii de străpungere în camera de stingere.

Constanta de timp depinde atât de mediul în care are loc arderea arcului electric cât și de dimensiunile geometrice ale coloanei acestuia, pentru calcule fiind utilă relația, [18]:

$$T_a = \frac{r_0^2}{2,4a_\theta}, \qquad (2.36)$$

unde r_0 reprezintă raza coloanei arcului electric iar a_θ - difuzivitatea căldurii în mediul de stingere; aceasta poate fi calculată cu relația:

$$a_\theta = \frac{\lambda}{\gamma c}, \qquad (2.37)$$

γ, c reprezentând densitatea, respectiv căldura specifică, iar λ- conductivitatea termică a mediului de stingere.

Relația (2.36) evidențiază faptul că mediile cu bune proprietăți de stingere a arcului electric trebuie să se caracterizeze prin difuzivitate a căldurii de valori cât mai mari.

Astfel de medii sunt azotul (constituent al aerului), hidrogenul, care rezultă din descompunerea chimică a uleiului mineral la temperatura arcului electric și hexafluorura de sulf (SF_6), mediu electroizolant și de stingere care stă la baza dezvoltării tehnicilor moderne în comutația de putere.

Arcul electric scurt se amorsează între contactele echipamentelor de comutație de joasă tensiune. Datorită lungimii sale mici, de ordinul 1...3 mm, stingerea se obține pe baza

proceselor din vecinătatea contactelor, neglijabile în cazul arcului electric lung.

Se constată astfel că pentru reamorsarea arcului electric scurt este necesar ca între contacte, după anularea intensității curentului, să fie aplicate tensiuni având valori de 150...250 V, în măsură să asigure gradientul de potențial corespunzător smulgerii electronilor din noul catod.

Dacă tensiunea înregistrată între contacte are valori mai mici, arcul electric scurt se stinge definitiv la prima trecere prin zero a intensității curentului.

Pe baza rezultatelor obținute din analiza proceselor care au loc la contacte, s-a dezvoltat tehnica de stingere a arcului electric prin efect de electrod, unanim acceptată pentru aparatele de comutație la joasă tensiune cu contacte în aer, [20].

2.2.4.. Comutația dinamică în curent continuu

Curentul continuu este prezent în instalațiile neconvenționale de transmisie a energiei electrice (în curent continuu de înaltă și foarte înaltă tensiune), unde problemele de comutație sunt deosebit de complexe, date fiind energiile de valori mari puse în joc.

Utilizarea curentului continuu este foarte răspândită în instalațiile de control de joasă tensiune și în anumite instalații de medie tensiune, unde comutația în aer atmosferic este aproape fără excepție acceptată.

Comutația în curent continuu este în general recunoscută ca având loc în condiții mai dificile decât cea din instalațiile de curent alternativ, acest caracter fiind imprimat în special de procesele care însoțesc stingerea arcului electric de deconectare.

Caracteristicile voltamper ale arcului electric pot fi statice sau dinamice, după cum viteza de variație a intensității curentului prin arc este foarte mică (în particular nulă) sau, dimpotrivă, are valori mari.

In timp ce arcul electric de curent alternativ poate fi modelat doar cu ajutorul caracteristicilor dinamice, arcului electric

de curent continuu îi sunt proprii atât caracteristici statice cât și dinamice.

In Fig.2.15a sunt reprezentate caracteristicile voltamper statice ale unui arc electric de curent continuu, obținute pentru diferite lungimi constante ale coloanei.

Corespunzător acestor curbe, pentru valori crescătoare ale curentului se înregistrează o mărire a temperaturii în coloana arcului, fapt care conduce la creșterea importantă a conductivității gazului, având ca efect scăderea tensiunii de arc.

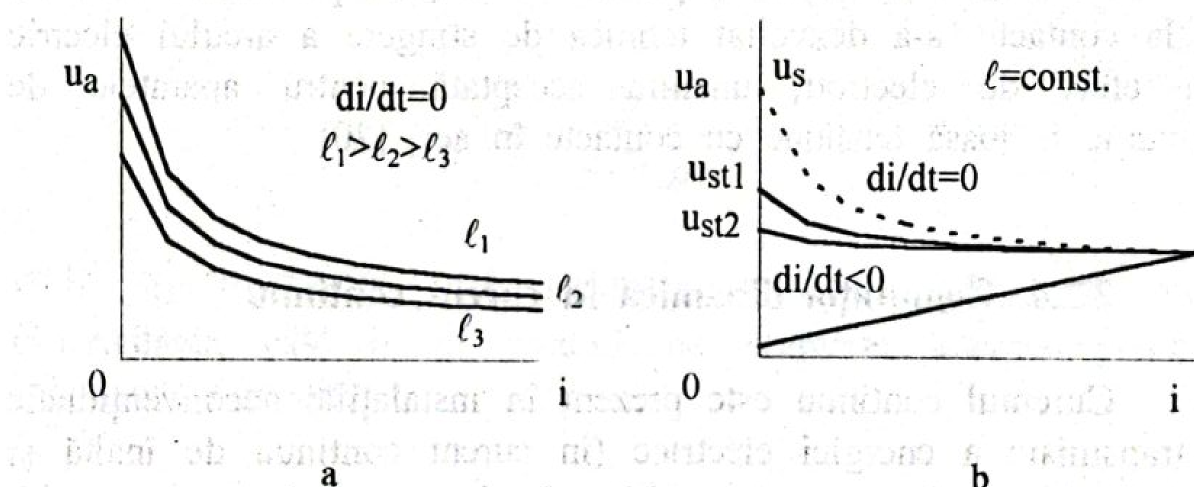


Fig.2.15

Caracteristicile arcului electric de curent continuu: a-statice; b-dinamice.

Caracteristicile voltamper dinamice se obțin pentru lungimi constante ale coloanei arcului, dar pentru viteze nenule de variație a intensității curentului.

In Fig.2.15b sunt reprezentate caracteristicile voltamper dinamice pentru un arc electric de curent continuu, obținute pentru diferite viteze, di/dt<0, de scădere a intensității curentului, [20].

Arcul electric se amorsează la tensiunea u_s, valorile tensiunii de stingere, u_{st}, fiind cu atât mai mici cu cât este mai mare viteza de scădere a curentului.

Fenomenul de histerezis, propriu acestor caracteristici, se explică prin inerția termică a coloanei arcului electric.

Tab.2.2

Materialul	Constanta			
	α [V]	β [VA]	γ [V/m]	δ [VA/m]
Cupru	30	10	1000	3000
Carbon	39	11,7	21	105

Din punct de vedere cronologic, modelarea arcului electric de curent continuu precede pe cea a procesului din curentul alternativ și constă în stabilirea unor funcții de aproximare pentru caracteristica voltamper statică. In acest sens este cunoscută funcția de aproximare propusă de Herta Ayrton [39], având expresia:

$$u_a(i) = a + \frac{b}{i}, \tag{2.38}$$

unde:

$$a = \alpha + \gamma\ell, \quad b = \beta + \delta\ell, \tag{2.39}$$

α, β, γ, δ fiind constante, iar ℓ - lungimea coloanei arcului electric. In Tab.2.2 sunt date valorile constantelor din funcția Hertei Ayrton, pentru diferite materiale ale contactelor.

Conform relațiilor (2.38), (2.39), funcția de aproximare Ayrton evidențiază o variație liniară a tensiunii de arc u_a în raport cu lungimea ℓ a coloanei, pentru valori constante ale intensității curentului.

Utilizată în calcule este și funcția de aproximare propusă de Nottingham, [30], [36]:

$$u_a(i) = a + c\ell + (b + d\ell)i^{-n}, \tag{2.40}$$

a, b, c, d fiind constante, ℓ - lungimea coloanei arcului electric, iar exponentul n, calculabil cu relația:

$$n = 2,62.10^{-4}T, \tag{2.41}$$

unde T reprezintă temperatura de vaporizare a anodului, exprimată în grade absolute.

In funcţiile de aproximare (2.38), (2.40) nu se ţine seama de independenţa căderilor de tensiune la electrozi (u_A, u_K) în raport cu lungimea ℓ a coloanei arcului. Acest aspect este considerat în funcţia de aproximare a lui Rieder, care are expresia:

$$u_a(i) = \alpha + (\beta + \ell)\gamma\left[\ln\left(\frac{i}{\delta}\right)\right]^{-3}, \qquad (2.42)$$

α, β, γ, δ fiind constante, iar ℓ - lungimea coloanei arcului electric. Valorile constantelor funcţiei (2.42) sunt date în Tab.2.3.

Tab.2.3

Materialul	Constanta			
	α [V]	β [m]	γ [V/m]	δ [A]
Cupru		0,013		
Argint	26	0,011	$5{,}4.10^5$	$7{,}4.10^{-3}$
Wolfram		0,016		

Se consideră circuitul de curent continuu din Fig.2.16, la deconectarea căruia, între contactele A, K, se înregistrează tensiunea $u_a(i)$.

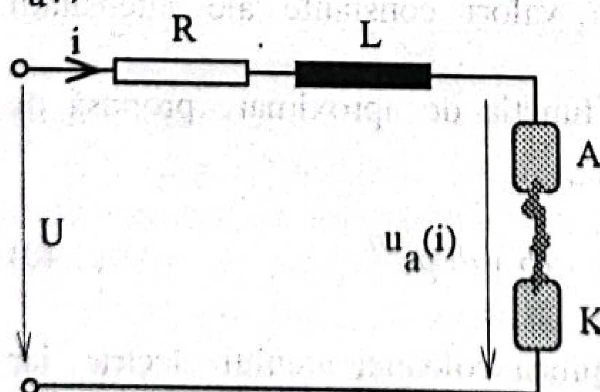


Fig.2.16
Stingerea arcului electric în circuite inductive

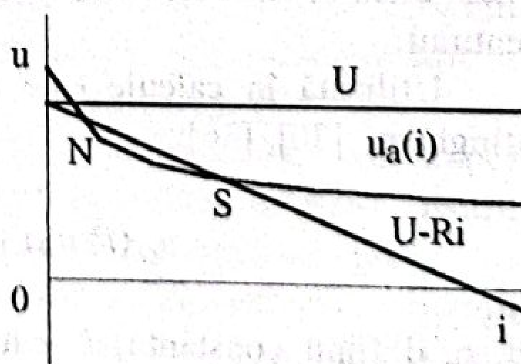


Fig.2.17
Analiza stingerii arcului electric în coordonate voltamper

Ecuaţia care descrie funcţionarea circuitului este de forma:

$$L\frac{di}{dt} + Ri + u_a(i) = U, \quad i(0) = i_0, \tag{2.43}$$

U fiind tensiunea continuă de alimentare. Considerând funcţia de aproximare Ayrton, pentru ecuaţia (2.43) se stabileşte expresia:

$$L\frac{di}{dt} + Ri + \alpha + \gamma\ell + \frac{\beta + \delta\ell}{i} = U, \quad i(0) = i_0, \tag{2.44}$$

α, β, γ, δ fiind constante, iar ℓ - lungimea coloanei arcului electric. In cazul arderii staţionare la curent constant a arcului, ecuaţia (2.44) devine algebrică, de forma:

$$Ri^2 - (U - \alpha - \gamma\ell)i + \beta + \delta\ell = 0. \tag{2.45}$$

Din analiza ecuaţiei (2.45) rezultă unele concluzii privind stabilitatea arderii arcului electric într-un circuit inductiv de curent continuu, [20]. Ecuaţia (2.45) poate admite două soluţii reale, pozitive şi distincte $i_1 \neq i_2$, caz în care circuitului din Fig.2.16 îi sunt proprii două puncte de funcţionare; fie acestea N şi S, Fig.2.17, determinate la intersecţia dreptei de sarcină (U - Ri) cu caracteristica voltamper, $u_a(i)$ a arcului electric.

Punctul de funcţionare N corespunde arderii instabile deoarece, la mici variaţii ale intensităţii curentului în jurul valorii corespunzătoare, fie aceasta i_1, rezultă tendinţe de variaţie divergente în raport cu i_1 (pentru $i > i_1$ se obţine $di/dt > 0$, deci o tendinţă de creştere a intensităţii, în timp ce pentru $i < i_1$ rezultă $di/dt < 0$, deci tendinţă de scădere a intensităţii curentului).

In acelaşi mod se arată că punctul S determină arderea stabilă a arcului deoarece, la variaţii ale curentului în jurul valorii de regim, rezultă tendinţe de variaţie convergente spre aceasta.

In regim static, deci la variaţii cu viteze di/dt oricât de mici ale intensităţii curentului, când tensiunea autoindusă pe bobină poate fi neglijată, condiţia necesară pentru stingerea arcului electric,

așa cum rezultă din caracteristicile reprezentate în Fig.2.17, se poate scrie sub forma:

$$u_a(i) \geq U - Ri, \quad \forall i. \tag{2.46}$$

Pentru aceasta este necesar ca ecuația (2.45) să admită cel mult o rădăcină dublă sau rădăcini complexe, ceea ce revine la a scrie:

$$(U - \alpha - \gamma\ell)^2 - 4R(\beta + \delta\ell) \leq 0. \tag{2.47}$$

Inecuația (2.47) delimitează domeniul, în planul coordonatelor (R, ℓ), pentru care stingerea arcului electric este certă.

In Fig.2.18 sunt reprezentate grafic, conform ecuației (2.47), granițele zonelor de ardere a arcului electric, pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare a circuitului considerat.

Arcul electric arde stabil pentru valori (R, ℓ) definind puncte localizate în zona dintre axele de coordonate și curbele de graniță și poate fi stins pentru dublete (R, ℓ) proprii unor puncte din afara acestei zone, [1].

Pentru valori (R, ℓ_{cr}) corespunzătoare unor puncte de funcționare situate pe curbele (2.47), arderea arcului este critică, punctele N, S (Fig.2.17) confundându-se.

Fig.2.18
Frontiere de stabilitate în domeniul (R, ℓ)

Condiția (2.46) privind stingerea arcului electric de curent continuu poate fi îndeplinită fie prin alungirea coloanei, fie prin creșterea rezistenței R a circuitului și, evident, printr-un procedeu combinat.

In cazul stingerii arcului prin alungirea coloanei, ținând seama de (2.45), (2.47), pentru intensitatea critică, i_{cr} a curentului se obține:

$$i_{cr} = \frac{U - \alpha - \gamma\ell_{cr}}{2R} = \frac{2(\beta + \delta\ell_{cr})}{U - \alpha - \gamma\ell_{cr}}. \tag{2.48}$$

O investigație sub raport calitativ asupra stingerii arcului electric de curent continuu se poate face neglijând inerția termică a coloanei, ceea ce revine la a considera caracteristicile dinamice identice cu caracteristica statică, [1].

Acceptând o valoare constantă pentru viteza v de alungire a coloanei arcului, ecuația diferențială (2.44) se poate scrie sub forma:

$$L\frac{di}{dt}+Ri+\alpha+\gamma vt+\frac{\beta+\delta vt}{i}=U,\quad i(0)=i_0\,. \tag{2.49}$$

Neglijând termenul neliniar, cu aport nesemnificativ mai ales în cazul unui circuit slab inductiv, ecuația (2.49) devine:

$$L\frac{di}{dt}+Ri+\alpha+\gamma vt=U,\quad i(0)=\frac{U-\alpha}{R}. \tag{2.50}$$

Soluția acesteia, reprezentând regimul tranzitoriu al curentului pe durata de ardere a arcului, se obține de forma:

$$i(t)=\frac{U-\alpha}{R}+\frac{Tv\gamma}{R}\left(1-\frac{t}{T}-e^{-\frac{t}{T}}\right), \tag{2.51}$$

unde:

$$T=\frac{L}{R}. \tag{2.52}$$

Durata de ardere t_a a arcului electric se determină prin anularea expresiei (2.51); dacă se notează:

$$\ell_a=vt_a, \tag{2.53}$$

ℓ_a fiind lungimea coloanei arcului în momentul stingerii, pentru durata de ardere se obține expresia:

$$t_a=-T\ln\left(1+\frac{U-\alpha-\gamma\ell_a}{Tv\gamma}\right). \tag{2.54}$$

Impunând condiţia $t_a > 0$, din relaţia (2.54) rezultă:

$$\ell_a > \frac{U-\alpha}{\gamma}. \tag{2.55}$$

Se evidenţiază astfel că stingerea arcului electric de curent continuu este posibilă numai dacă lungimea coloanei acestuia depăşeşte o valoare limită.

Regimul tranzitoriu al curentului prin coloana arcului electric este reprezentat în Fig.2.19. In ipoteza $t_a >> T$, termenul exponenţial din expresia (2.51) se poate neglija, obţinându-se:

$$t_a \cong T + \frac{U-\alpha}{\gamma v}, \quad \ell_a \cong Tv + \frac{U-\alpha}{\gamma}. \tag{2.56}$$

Relaţiile (2.56) evidenţiază că atât durata de ardere cât şi lungimea maximă a arcului electric au valori dependente de constanta de timp a circuitului deconectat, cu atât mai mari cu cât caracterul acestuia este mai inductiv.

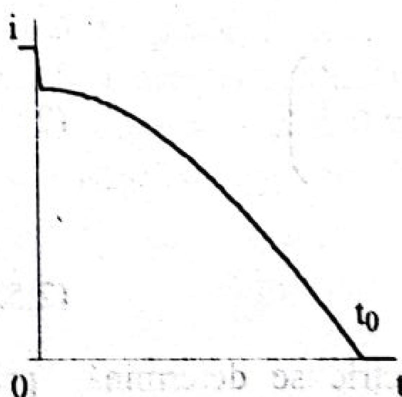


Fig.2.19
Curentul de arc pe durata deconectării

Prelungirea duratei de ardere a arcului electric are loc pe seama energiei acumulate în câmpul magnetic al bobinelor din circuit; tensiunea autoindusă pe acestea suplimentează, la scăderea intensităţii curentului, tensiunea sursei de alimentare.

Deconectarea dinamică a circuitelor rezistive de curent continuu este descrisă de ecuaţia algebrica (2.45).

In ipotezele simplificatoare menţionate la deconectarea unui circuit inductiv, pentru intensitatea curentului, din (2.45) se obţine expresia:

$$i(t) = \frac{1}{2R}\left(U-\alpha-\gamma vt+\sqrt{(U-\alpha-\gamma vt)^2-4R(\beta+\delta vt)}\right). \tag{2.57}$$

In momentul t=0 al separării contactelor, ca urmare a amorsării arcului electric, intensitatea curentului din circuit scade brusc de la:

$$I = \frac{U}{R}, \tag{2.58}$$

la valoarea:

$$i(0) = \frac{1}{2R}\left(U - \alpha + \sqrt{(U-\alpha)^2 - 4\beta R}\right) < I, \tag{2.59}$$

după care se înregistrează o scădere continuă până la stingere, obținută în momentul corespunzător căruia intensitatea curentului atinge valoarea critică i_{cr}, dată de relațiile (2.48).

Tinând seama de faptul că, în acest caz, se poate scrie:

$$\ell_a = \ell_{cr} = vt_a, \tag{2.60}$$

din relațiile (2.48_1), (2.60), pentru durata t_a, de ardere a arcului electric, rezultă expresia:

$$t_a = \frac{U - \alpha - 2Ri_{cr}}{\gamma v}. \tag{2.61}$$

Comparând relațiile (2.56)...(2.61), rezultă că atât durata de ardere t_a cât și lungimea maximă ℓ_a, corespunzătoare arcului electric de curent continuu, depind de natura circuitului deconectat, prezența bobinelor făcând mai dificil procesul de stingere.

Stingerea arcului electric în momentul corespunzător căruia intensitatea curentului atinge valoarea critică se explică prin faptul că sursa de alimentare nu mai poate acoperi energia disipată sub formă de căldură la nivelul coloanei. Dacă R_a reprezintă rezistența arcului electric la un moment dat, puterea electrică P_a furnizată de sursă arcului are expresia:

$$P_a = R_a\left(\frac{U}{R + R_a}\right)^2. \tag{2.62}$$

Valoarea maximă, P_{am} a puterii P_a se obţine atunci când rezistenţa arcului egalează pe cea a circuitului deconectat, obţinându-se:

$$P_{am} = \frac{U^2}{4R} = \frac{P_m}{4}. \tag{2.63}$$

Relaţia (2.63) evidenţiază faptul că pe coloana arcului se poate repartiza cel mult 25% din puterea maximă furnizată de sursă circuitului; arcul electric de curent continuu poate fi stins numai dacă puterea disipată de coloana acestuia sub formă de căldură în unitatea de timp depăşeşte 25% din puterea maximă furnizată de sursă circuitului deconectat. In curent alternativ puterea P_0, de răcire a arcului în vederea stingerii, are valori mult mai mici, de ordinul 0,03% din P_m, [23].

Potrivit consideraţiilor expuse, rezultă că există două posibilităţi de principiu aplicabile în vederea stingerii arcului electric de curent continuu: translarea caracteristicii voltamper spre valori crescătoare ale tensiunii de arc, respectiv rotirea dreptei de sarcină corespunzător unor valori crescătoare ale rezisteţei circuitului deconectat.

Sub raport tehnic, aceste procedee presupun alungirea coloanei arcului şi deionizarea puternică a acesteia prin răcire, la care se poate adăuga creşterea rezistenţei circuitului. Utilizarea, separată sau combinată, a procedeelor menţionate conduce la limită la confundarea punctelor de funcţionare N şi S (Fig.2.17), condiţia necesară pentru obţinerea stingerii fiind astfel îndeplinită.

Tehnicile de comutaţie dinamică în instalaţiile de joasă tensiune de curent continuu constau în stingerea arcului electric de deconectare utilizând camere de stingere prevăzute cu sisteme de fante, şicane şi grile, electroizolante sau metalice, realizate într-o multitudine de variante, cărora li se asociază suflajul magnetic.

Comutaţia dinamică în instalaţiile de curent continuu de înaltă tensiune şi mare putere apelează în prezent în mod unanim la principiul modulării curentului de arc, condiţiile stingerii unui arc electric de mare putere traversat de curent continuu transferându-se astfel în domeniul arcului electric de curent alternativ unde

stingerea definitivă este facilitată de anularea naturală a intensității curentului.

In Fig.2.20a este prezentată schema electrică de principiu a procedeului, ilustrând întreruperea unui curent de scurtcircuit.

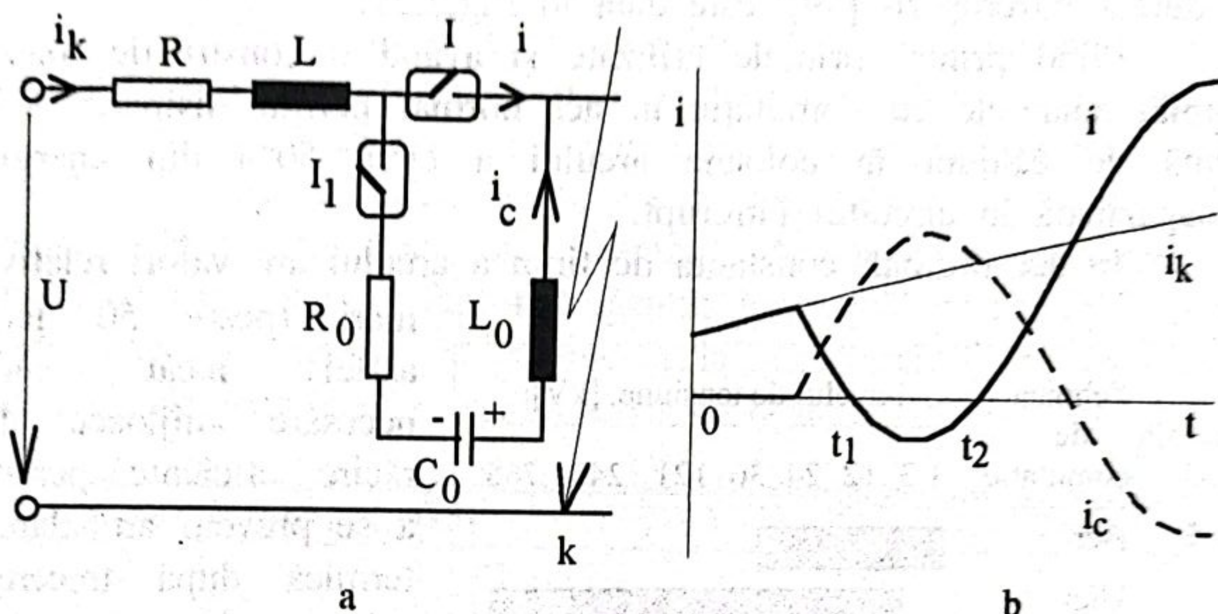


Fig.2.20

Modularea curentului de arc: a-schema electrică; b-regimul tranzitoriu.

Aceasta conține întrerupătoarele I-principal și I_1-auxiliar. Prin închiderea întrerupătorului auxiliar I_1, se permite descărcarea condensatorului de capacitate C_0, inițial încărcat cu polaritatea din figură.

La întreruperea unui curent de scurtcircuit i_k, după deschiderea întrerupătorului I se închide întrerupătorul I_1, încât, pentru intensitatea i(t) a curentului prin arc rezultă:

$$i(t) = i_k(t) - i_c(t), \tag{2.64}$$

$i_c(t)$ fiind intensitatea curentului de descărcare oscilantă a condensatorului.

Dimensionând corespunzător circuitul de descărcare R_0, L_0, C_0, se obține anularea intensității i(t) a curentului prin arc, stingerea fiind posibilă în momentele t_1, t_2, ș.a.m.d., de trecere prin zero a acesteia, Fig.2.20b.

2.3. Tehnici tradiţionale în comutaţia de putere

O prezentare sintetică a tehnicilor specifice comutaţiei de putere, în ordinea minimizării energiei disipate in coloana arcului pe durata întreruperii [39], este dată în Fig.2.21.

Fiind printre primele utilizate şi având o construcţie foarte simplă, aparatele cu comutaţie în aer normal permit disiparea sub formă de căldură în coloana arcului a circa 50% din energia înmagazinată în circuitul întrerupt.

In aer normal, constanta de timp a arcului are valori relativ mari (peste 50 μs), astfel încât sunt necesare mijloace de răcire eficiente pentru a se preveni ambalarea termică după trecerea prin zero a curentului şi a se obţine stingerea definitivă a arcului. O constantă de timp de valori mari permite de asemenea realizarea comutaţiei cu un factor de oscilaţie redus, calitate deosebit de necesară îndeosebi în instalaţiile de joasă tensiune.

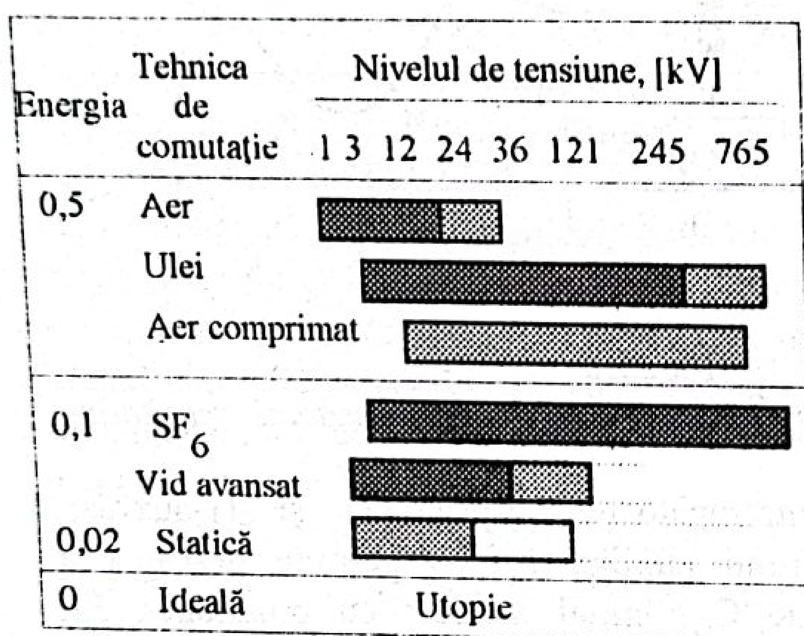


Fig.2.21
Principalele tehnici în comutaţia de putere

Performanţele obţinute în construcţia aparatelor cu comutaţie în aer la joasă tensiune au încurajat extinderea acestei tehnici şi la tensiuni mai mari, ajungându-se până la nivelul de 20 kV.

Dacă în prezent se mai poate constata supremaţia acestor aparate, atunci aceasta este restrânsă doar la construcţiile de joasă tensiune, care se caracterizează prin simplitate,. indicatori de fiabilitate superiori şi grad ridicat de securitate; extinderea la tensiuni superioare este blocată de dezavantaje majore, cum ar fi dimensiunile de gabarit exagerat de mari, corespunzătoare distanţelor

de izolaţie în aer. Sunt totuşi construite şi utilizate contactoare electromagnetice de medie tensiune, caracterizate însă prin capacitate redusă de deconectare tensiune nominală de numai 6 kV, [17].

Creşterea capacităţii de vehiculare a fluxurilor de energie electrică prin creşterea tensiunii nominale a instalaţiilor a impus o nouă tehnică, aceea a comutaţiei în ulei mineral, mediu electroizolant şi de stingere cu proprietăţi superioare aerului normal.

Analiza atentă a fenomenelor care au loc la stingerea arcului electric în ulei justifică aserţiunea potrivit căreia [39], uleiul este mediu electroizolant şi doar "furnizor" de mediu de stingere care, în acest caz, este de fapt hidrogenul; împreună cu ceilalţi compuşi din Tab.2.4, acesta se obţine prin descompunerea chimică a uleiului, la temperatura arcului electric, [23].

Tab.2.4

Energia arcului, [kJ]		1	100
H_2 C_2H_4 CH_4	70% 20% 10%	0,1 ℓ	10 ℓ
Carbon		0,03 g	3 g

Cantitatea procentual mare de hidrogen obţinută prin descompunerea uleiului şi proprietăţile termice remarcabile ale acestui gaz exercită asupra coloanei arcului electric, prin răcirea acesteia, un puternic efect deionizant.

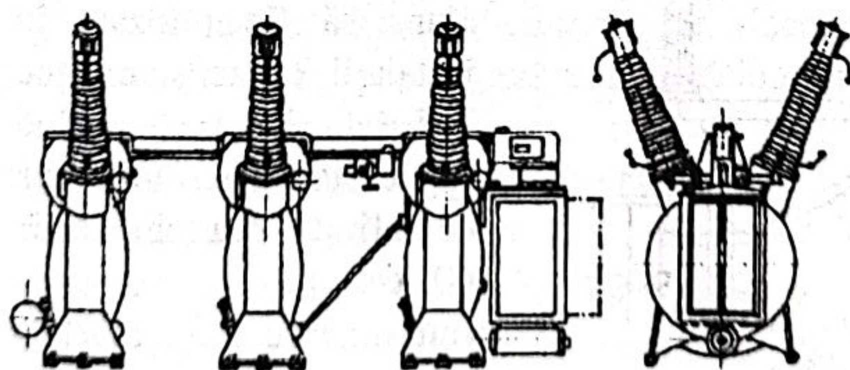


Fig.2.22
Intrerupător cu ulei mult

Sub raport cronologic, primele tipuri de întrerupătoare cu comutaţie în ulei sunt cunoscute sub numele de întrerupătoare cu ulei mult (Fig.2.22) care, în pofida dimensiunilor de gabarit şi a unor cantităţi enorme, de zeci de tone de ulei pe pol, au fost

fabricate la parametri atingând valori performante în epocă (330 kV/25 kA), [14].

Utilizarea materialelor electroizolante solide și perfecționarea dispozitivelor de stingere au permis reducerea dimensiunilor de gabarit, a masei totale a aparatului și, în special, a volumului de ulei.

Următoarea generație, cea a întrerupătoarelor cu ulei puțin, a fost extinsă la tensiuni foarte înalte prin construcția camerelor de stingere pe principiul modulului (Fig.2.23) și realizarea de întreruperi multiple pe pol [17], [18], [20], [39]. Progresele înregistrate în construcția întrerupătoarelor cu ulei au făcut ca acestea să cunoască o lungă perioadă de monopol, extinsă până spre anii 1930-1940, [39].

Comutația în ulei reprezintă în mod incontestabil prima tehnică în care se utilizează un mediu de stingere caracterizat prin valori mici ale constantei de timp a arcului electric, fapt care a permis ca aceste echipamente să facă față cu succes dificultăților care însoțesc întreruperea curenților sub tensiuni tot mai mari; ele au ajuns să fie utilizate în instalații cu tensiunea de 765 kV, având capabilitatea să întrerupă curenți de scurtcircuit de 40 kA.

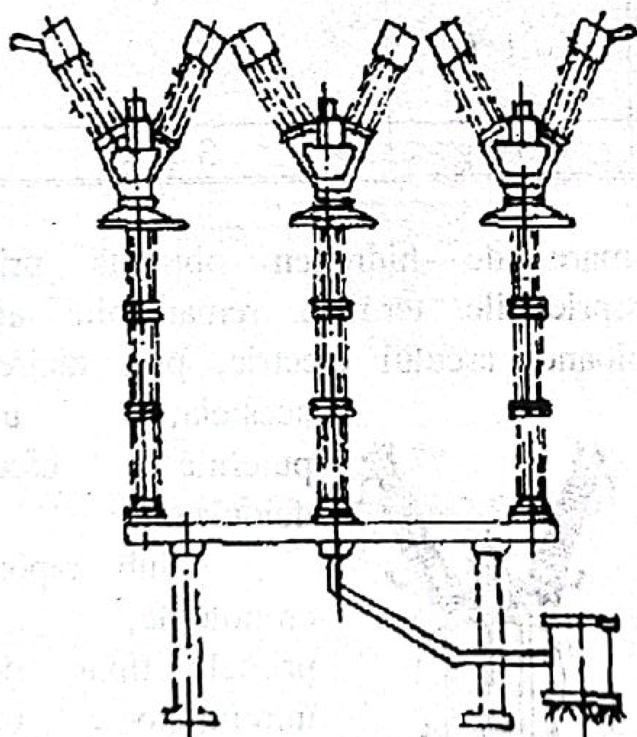


Fig.2.23
Intrerupător cu ulei puțin

Intreruperile repetate antrenează deteriorarea progresivă a contactelor și, mai mult, acumularea în ulei a unei cantități crescânde de carbon în suspensie, în măsură să afecteze proprietățile electroizolante ale acestuia. Menținerea în funcțiune cu un grad ridicat de securitate reclamă revizii periodice lungi, care vin în

contradicție cu ideea reducerii duratelor de mentenanța și creșterii disponibilității echipamentului în instalațiile moderne. Dacă se adaugă pericolul sporit de incendiu și chiar de explozie, se obține în bună parte explicația declinului acestei tehnici de comutație, în special în domeniul performant (valori nominale mari pentru tensiune, curent și capacitate de rupere la scurtcircuit).

Intrerupătoarele cu ulei puțin constituie încă o tehnică de comutație existentă azi în exploatare și pe piața aparatelor cu caracteristici modeste și medii. Nu există nici o îndoială însă că progresele înregistrate în dezvoltarea tehnicilor moderne vor conduce la dispariția lor. După datele furnizate de firma Merlin Gerin, din numărul total al întrerupătoarelor de medie tensiune produse și vândute în CEE, cele cu ulei puțin au scăzut de la 67,8% în 1980 la 23,7% în 1990, tendința de scădere păstrându-se, [40].

Bazele tehnicilor de comutație în gaze sub presiune se pun în jurul anilor 1930, când apar primele întrerupătoare cu aer comprimat. Inainte de orice, acestea au încercat să răspundă unor cerințe de securitate, în contextul unor incendii și explozii ale întrerupătoarelor cu ulei mult, care atinseseră apogeul.

In construcția întrerupătoarelor cu aer comprimat, drept mediu electroizolant și de stingere se folosește aerul la presiune mai mare decât cea atmosferică. La multe construcții, energia acumulată în aerul sub presiune servește și pentru acționarea întrerupătorului.

Stingerea arcului electric de deconectare se obține prin suflarea acestuia cu aer comprimat, deionizarea coloanei având loc în principal prin difuzie.

Procesul de stingere depinde de mai mulți parametri, dintre care se menționează presiunea și viteza aerului în ajutajele camerei de stingere, secțiunea ajutajelor de eșapare și orientarea jetului de aer în raport cu coloana arcului electric, lungimea acestei coloane la un moment dat, viteza de creștere a tensiunii tranzitorii de restabilire. Spre deosebire de întrerupătoarele cu ulei, intensitatea suflajului, dată în principal de presiunea și viteza în ajutaj a aerului comprimat, este independentă de energia arcului electric, fiind condiționată numai de construcția dispozitivului de stingere; de aici necesitatea unor măsuri suplimentare privind evitarea consecințelor

tendinței de funcționare cu tăiere (smulgere) de curent, în special la întreruperea curenților de mică intensitate. Creșterea presiunii aerului are ca efect creșterea rigidității dielectrice, în același timp obținându-se și ameliorarea condițiilor de stingere a arcului, prin scăderea constantei de timp a acestuia.

Corespunzător curbelor lui Paschen (Fig.2.2), pentru o valoare dată a tensiunii de străpungere, creșterea presiunii conduce la distanțe de izolație mai mici, deci la micșorarea dimensiunilor de gabarit; la aparatele construite, în funcție de caracteristicile specifice variantei, valorile de lucru ale presiunii sunt de ordinul 2...3 MPa.

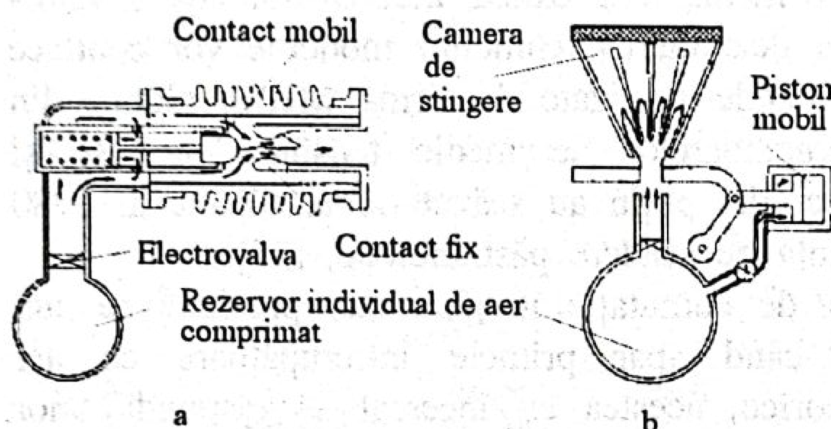


Fig.2.24

Intrerupătoare cu aer comprimat de medie tensiune

Intrerupătoarele cu aer comprimat se deosebesc prin particularitățile constructive ale camerelor de stingere și prin modul în care se asigură nivelul de izolație între contactele deschise.

In general [41], întrerupătoarele construite sunt echipate cu camere de stingere funcționând cu suflaj longitudinal (Fig.2.24a), pentru medie tensiune existând însă și variante prevăzute cu camere de stingere având suflaj transversal (Fig.2.24b). Acestea din urmă se caracterizează printr-o eficiență superioară a suflajului, dar au dezavantajul unui consum sporit de aer comprimat, eșaparea acestuia făcându-se în atmosferă.

Deoarece lungimea arcului electric, optimă sub raportul stingerii, rezultă în general mai mică decât distanța de izolație dintre contactele deschise, întrerupătoarele cu aer comprimat sunt prevăzute cu separatoare de secționare, având rolul de a realiza distanțele de izolație necesare. In funcție de tipul constructiv, separatoarele de secționare pot fi amplasate în aer liber (aparate de

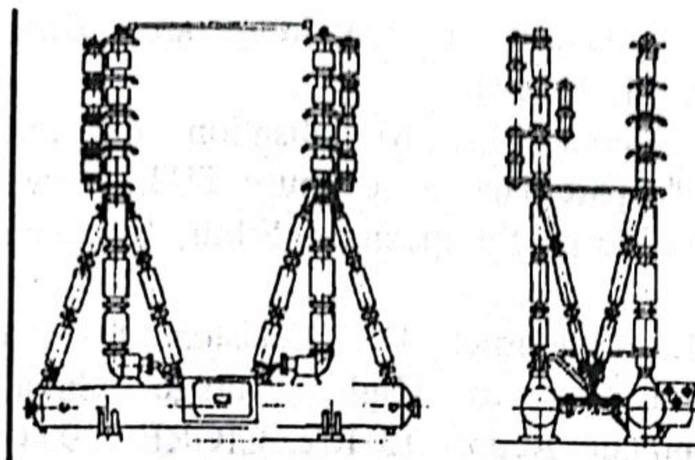


Fig.2.25
Intrerupător cu aer comprimat de înaltă tensiune

medie tensiune) sau în incinte umplute cu aer comprimat (înaltă şi foarte înaltă tensiune). Progresele înregistrate de tehnica comutaţiei în aer comprimat au condus la obţinerea unor aparate cu parametri electrici notabili, care însă nu mai păstrează în momentul de faţă decât următoarele două destinaţii, [23]: întrerupătoare de generator şi întrerupătoare de exterior (Fig.2.25), ce pot fi folosite în zone cu climat deosebit de aspru. Acestea sunt capabile să funcţioneze satisfăcător şi la temperaturi de -40 ^{0}C, graţie absenţei tendinţei de lichefiere a aerului comprimat. Admisia aerului comprimat în camera de stingere poate fi temporară, numai pe durata stingerii arcului electric sau permanentă. Construcţiile având camere de stingere permanent umplute cu aer comprimat se caracterizează prin distanţe de izolaţie mai mici între contacte şi deci prin dimensiuni de gabarit reduse.

Alte tehnici de comutaţie convenţionale, utilizând medii de stingere diverse (apa, gazele de descompunere a unor materiale electroizolante solide etc.) au avut arie de răspândire restrânsă şi existenţă efemeră.

Bibliografie

1. Baraboi A., Echipamente electrice. Inst. Polit. Iasi, 1989.
2. Baraboi A., Hnatiuc E., Adam M., Study about one possibility of modelation of the electric arc. Seventh International Conference "Switching Arc Phenomena", Lodz, Poland, I (1993).
3. Baraboi A., Adam M., Hnatiuc E., Unified Cassie-Mayr model aided computation of the ac arc's characteristics. XIth

Symposium on physics of switching arc, Brno, Czech Republic, 21, (1994).
4. Baraboi A., Adam M., Leonte P., Modélisation de l'arc électrique dans l'appareillage de coupure THT. Very High Voltage Networks Symposium, Sibiu, Romania, I, 147 (1995).
5. Blatter J., Aeschbach H., Dufournet D., Christen J., Arc Modelling Application to High Voltage Circuit Breaker Development. Report 13-102, CIGRE (1994).
6. Browne T. E., An Approach to Mathematical Analysis of A-C Arc extinction in Circuit Breakers. AIEE Trans., PAS, 77, 1508 (1959).
7. Cassie A. M., Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des circuits. CIGRE, rapport 102 (1939).
8. Cividjian G., A., About black box arc model in relative units. XIth Symposium on physics of switching arc, Brno, Czech Republic, 33, (1994).
9. Claessens M., Möller K., Rütten U., Thiel H. G., Stechbarth J., Progress in Modelling of Circuit-Breaker Arcs Considering Gas Flow Interaction. Report 13-108, CIGRE (1994).
10. Claessens M., Möller L., Knobloch H., Kirchesch P., Thiel H. G., Progress in Circuit-Breaker Modelling with Respect to Ablation Controlled Arcs, Pressure Build-up and Performance Limits. Report 13-112, CIGRE (1994).
11. Cowley M. D., Chan S. K., Fang M. T. C., Integral methods of analysing electric arcs (part III). J. Phys. D., 9, 1085 (1976).
12. Delalondre C., Zahrai S., Simonin O., Modélisation des turbulences dans l'arc électrique. Collection de notes internes de la DER, EDF (1993).
13. Fechant L., Appareillage électrique à basse tension. Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
14. Flurscheim C. H., Teoriia i konstrukţii vîkliuciatelei. Energoizdat, Leningrad, 1982 (trad. din lb. engleză).

15. Grütz A., Hochrainer A., Rechnerische Untersuchung von Leistungsschaltern mit Hilfe einer verallgemeinerten Lichtbogentheorie. ETZ-A, 92, 185 (1971).
16. Hermann W., Ragaller K., Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers. IEEE Trans. on Power App. and Syst., PAS-96, 1546 (1977).
17. Herşcovici B. ş.a., Aparate electrice de înaltă tensiune. Indreptar. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1978.
18. Hortopan Gh., Aparate electrice, EDP Bucureşti, 1981.
19. Legros V., Genon A. M., Circuit breaker stochastic behaviour simulation. Symp. on HV Switch. Equip., Sydney, 38 (1979).
20. Leonte P., Hnatiuc E., Baraboi A., Aparate electrice. Inst. Polit. Iaşi, 1981.
21. Mayr O., Beitrge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. Archiv für Electrotechnik, 37, 588 (1943).
22. Nakamishi Y., Tuma D. T., Analysis of electric arcs in AC circuits. IEEE Trans. on PAS, 102, 586 (1983).
23. Pelenc Y., Appareillage électrique d'interruption à haute tension. Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
24. Portela C., Dupont C., Meirelles M. P., Deterministic and Statistic Arc Modelling. Report 13-107, CIGRE (1994).
25. Rieder W., Urbanek J., New aspects of current zero research on circuit-breaker reignition. A theorie of thermal nonequilibrium arc conditions. Report 107, CIGRE (1966).
26. Savin Gh., Rosman H., Circuite electrice neliniare şi parametrice. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1973.
27. Scarpa P., Les modèles d'arc: des outils de développement des disjoncteurs. Journée SF_6, AIM Liège (1988).
28. Schwartz J., Dynamisches Verhalten eines gasbeblasenen, turbulenz-bestimmten Schaltlichtbögen. ETZ Arch., 3, 87 (1979).
29. Sporckmann B., Ein Stochastisches Lichtbogenmodell zur Berechnung von Ausschaltvorgängen von

Hochspannungsleistungs-schaltern. ETZ-A, 99, 758 (1978).

30. Suciu I., Bazele echipamentelor electrice. Ed. Facla, Timişoara, 1980.

31. Swanson B. W., Roidt R. M., Boundary layer analysis of an SF_6 circuit breaker arc. IEEE Trans. on Power App. and Syst., 90, 1086 (1971).

32. Thiel H. G., Theoretical investigation of the different arc quenching phenomena in SF_6 and air blast circuit breakers. Wiss. Ber. AEG Telefunken, 52, 185 (1979).

33. Urbanek J., Zur berechnung des Schaltverhaltens von Leistungschaltern, eine erweiterte Mayr-Gleichung. ETZ-A, 93, 381 (1972).

34. Van der Sluis L., Rutgers W. R., Comparison of test circuits for high-voltage circuit breakers by numerical calculations with arc models. IEEE Trans. on Power Delivery, 7, 4 2037 (1992).

35. Van der Sluis L., Damstra G. C., Rutgers W. R., Schoonenberg G. C., The Modelling of Circuit-Breaker Arcs, Application in Design and Testing of Switchgear. Report 13-111, CIGRE (1994).

36. Vasilieivici A., Aparate electrice. Inst. Polit. "Traian Vuia" Timişoara, 1985.

37. Zahrai S., Simonin O., Etude de la structure d'un arc électrique à fort courant dans le SF_6. Collection de notes internes de la DER, EDF (1993).

38.* * * Applications of Black Box Modelling to Circuit Breakers. Final Report CIGRE, EG 13-01 (1992).

39.* * * L'arc électrique et ses applications. Ed. CNRS, Paris, 1984.

40.* * * Le SF_6 technologie universelle en moyenne tension. Catalogue Merlin Gerin VP0371 (1991).

41.* * * Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers. Ed. by Kunio Nakanishi, Marcel Dekker Inc. New York-Basel-Hong Kong, 1991.

Capitolul 3

TEHNICI MODERNE DE COMUTATIE IN HEXAFLUORURA DE SULF

Progresele înregistrate în tehnica echipamentelor de comutaţie sunt strict condiţionate de descoperirea şi utilizarea convenabilă a unor medii electroizolante care, în acelaşi timp să posede şi cât mai bune proprietăţi de stingere a arcului electric.

In paralel cu întrerupătoarele de putere realizate în tehnici tradiţionale (ulei puţin, aer comprimat etc.) firmele specializate au fabricat, în ultimele trei decenii, echipament de comutaţie bazat pe o tehnică nouă, cea a comutaţiei în hexafluorură de sulf.

In prezent, datorită performanţelor atinse, aceste aparate cunosc o tot mai largă utilizare şi tind să înlocuiască tehnica de comutaţie tradiţională.

3.1. Hexafluorura de sulf

Hexafluorura de sulf (SF_6) a fost sintetizată pentru prima dată de francezii H. Moissan şi P. Lebeau care, în 1906, au primit Premiul Nobel pentru chimie. In anul 1937, Charlton şi Cooper propun utilizarea acestui gaz în construcţia echipamentelor electrice. Primele întrerupătoare cu hexafluorură de sulf se construiesc în SUA începând cu anul 1953 şi în Europa după 1960, [16], [34].

Hexafluorura de sulf este unul din cele mai grele gaze; datorită masei sale moleculare mari (146 faţă de 28 şi 32 pentru azot, respectiv oxigen, [29]) densitatea sa, în condiţii normale de

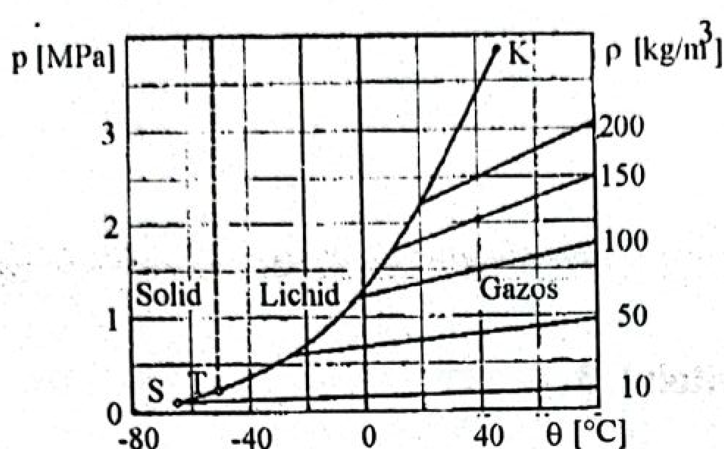


Fig.3.1

Diagrama de stare a hexafluorurii de sulf: K-punct critic; S-punct de sublimare; T-punct de topire.

presiune și temperatură, este de 6,319 kg/m^3, de aproape cinci ori mai mare decât cea corespunzătoare aerului. Este incolor, inodor și, până la o anumită concentrație în aer, netoxic. Raportate la valorile pentru aer, căldura specifică volumică este este de 3,7 ori mai mare, iar conductivitatea sonică de circa trei ori mai mică.

In alegerea presiunii de lucru, trebuie avută în vedere curba de lichefiere a gazului, dată în Fig.3.1, [18]. Pentru prevenirea lichefierii, în construcția echipamentelor de exterior, care funcționează la temperaturi joase cu hexafluorură de sulf la presiuni relativ ridicate, se prevăd dispozitive suplimentare de încălzire. In construcțiile foarte recente, pericolul lichefierii este înlăturat prin utilizarea hexafluorurii de sulf în amestec cu azot, [23].

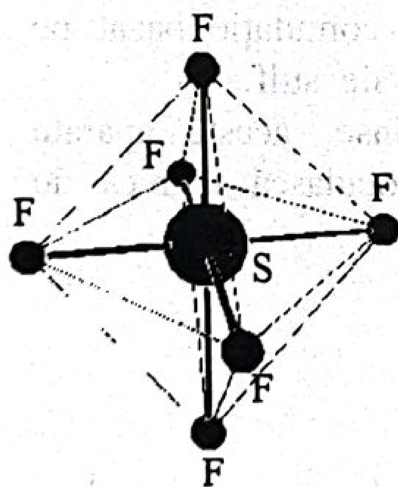


Fig.3.2

Structura moleculei de hexafluorură de sulf

Structura moleculei de hexafluorură de sulf este octaedrică, Fig.3.2, având în centru un atom de sulf S, cele șase vîrfuri fiind ocupate fiecare de câte un atom de fluor, F. Legăturile dintre atomii de sulf și fluor sunt covalente, fapt care conferă moleculei acestui gaz un înalt grad de stabilitate. Descompunerea gazului SF_6 se produce la temperaturi care depășesc 500 ^oC [34], fiind necesară alegerea judicioasă a materialelor cu care acesta vine în contact; gazul SF_6 se comportă bine în prezența unor metale și aliaje ca Al, Mg, Ag, Ni, Cu, Pb, bronz fosforos, fiind interzis însă contactul cu compuși care conțin siliciu.

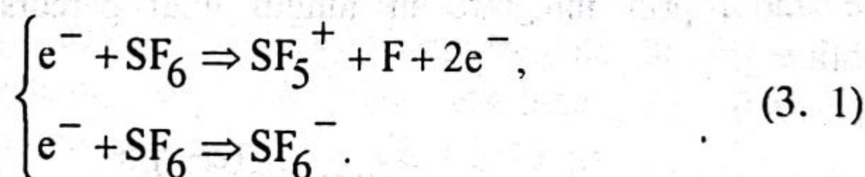
Majoritatea metalelor și aliajelor folosite în construcțiile electrotehnice funcționează deci în bune condiții în hexafluorură de

sulf; fac excepţie compuşii care conţin siliciu şi materialele electroizolante pe bază de hidrogen, în locul acestora din urmă utilizându-se teflonul.

Sub acţiunea descărcărilor electrice, hexafluorura de sulf suferă o uşoară descompunere, fără alterarea proprietăţilor fizice şi chimice; compuşii rezultaţi sunt fluoruri inferioare, unele toxice, care pot fi însă absorbite în mod eficient de filtre din alumină (Al_2O_3).

Calitatea unui gaz de a fi electroizolant, deci proprietăţile sale dielectrice, se explică prin comportarea moleculelor acestuia la impactul cu elecroni liberi, acceleraţi în câmp electric. Un rol important în amorsarea descărcărilor în gaze îl au astfel ionizările prin şoc, în urma cărora se obţine multiplicarea numărului purtătorilor de sarcină.

Intr-un volum de gaz SF_6, cele mai probabile procese de ionizare produse de electronii liberi acceleraţi în câmp electric sunt de forma [22]:



$$\begin{cases} e^- + SF_6 \Rightarrow SF_5^+ + F + 2e^-, \\ e^- + SF_6 \Rightarrow SF_6^-. \end{cases} \qquad (3.\ 1)$$

Dacă reacţia (3.1_1) este tipică pentru multiplicarea numărului de electroni la descărcarea electrică în orice gaz, reacţia (3.1_2) este proprie gazelor electronegative, dintre care face parte şi hexafluorura de sulf.

Molecula gazului SF_6 are proprietatea de a capta uşor electronii liberi, mai ales când viteza acestora este mică. In urma reacţiilor de forma (3.1_2) rezultă ioni negativi stabili, care se caracterizează printr-o probabilitate neglijabilă de a produce, la rândul lor, ionizări prin şoc, deoarece mobilitatea lor este foarte redusă (masă mare, parcurs mediu de valoare mică). Astfel, se poate considera că, în urma reacţiilor de forma (3.1_2), numărul electronilor liberi, capabili să producă ionizări prin ciocniri cu particule neutre, scade. Aceste reacţii au loc în hexafluorura de sulf chiar şi atunci cînd câmpul electric exterior lipseşte, densitatea

electronilor liberi fiind astfel, în condiţii normale, mai mică decât în alte gaze.

Reacţia (3.1_1) se caracterizează prin cifra de ionizare α (primul coeficient al lui Townsend) definită ca fiind numărul de perechi de purtători de sarcină, generaţi de un singur electron accelerat în câmp electric, pe unitatea de lungime a drumului parcurs.

Reactia (3.1_2) este caracterizată prin cifra de captare η, reprezentând numărul purtătorilor de sarcină care se pierd în urma captării unui electron, raportat la unitatea de lungime a drumului.

In aceste condiţii, considerând că fiecare electron care parcurge într-un volum de gaz SF_6 distanţa dx produce $(\alpha-\eta)dx$ electroni noi, pentru diferenţa de electroni produsă de un număr n de electroni acceleraţi pe drumul dx rezultă:

$$dn = n(\alpha - \eta)dx, \tag{3. 2}$$

de unde, prin integrare în lungul unui parcurs de lungime x, se obţine:

$$n = n_0 e^{(\alpha-\eta)x}, \tag{3. 3}$$

n_0 fiind numărul iniţial de electroni.

Relaţia (3.3) evidenţiază că într-un volum de gaz SF_6 este posibilă creșterea numărului de electroni numai dacă intensitatea câmpului electric are astfel de valori încât $(\alpha-\eta) > 0$. Dacă $(\alpha-\eta) < 0$, numărul electronilor scade exponenţial pe drumul parcurs, fiind captaţi în întregime de moleculele de gaz SF_6; ionii negativi rezultaţi (SF_6^-) migrează spre anod, unde se neutralizează.

In Fig.3.3 sunt reprezentate grafic curbele $\alpha/p_0=f_1(E/p_0)$ și $\eta/p_0=f_2(E/p_0)$, corespunzătoare aerului respectiv hexafluorurii de sulf, p_0 fiind o valoare de referinţă pentru presiune. Potrivit acestora, valorile critice ale intensităţii câmpului electric raportate la presiunea gazului sunt de 27 V/m.Pa pentru aer, respectiv de 89 V/m.Pa pentru hexafluorură de sulf, descărcarea în aceste gaze fiind posibilă la depășirea valorilor precizate.

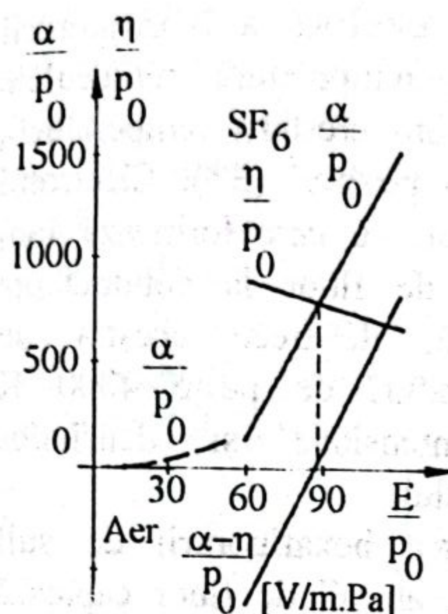


Fig.3.3

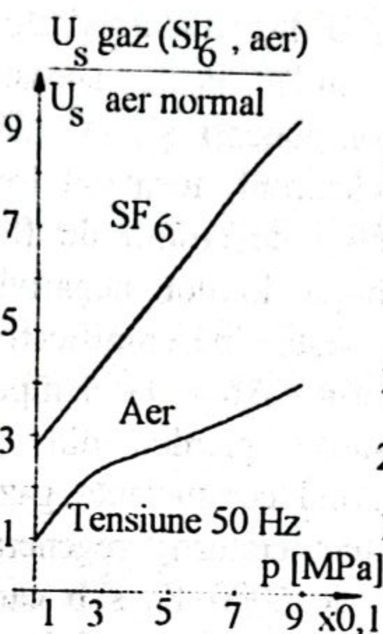


Fig.3.4

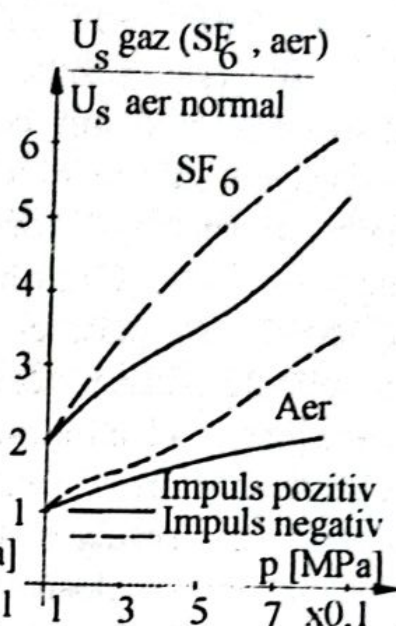


Fig.3.5

Proprietățile dielectrice excepționale ale gazului rezultă și prin compararea curbelor care reprezintă dependența tensiunii de străpungere U_S, corespunzătoare unor spații disruptive considerate în aer și în gaz SF_6; aceste curbe sunt reprezentate în Fig.3.4 și Fig.3.5, pentru cazurile solicitării cu tensiune de frecvență industrială, respectiv cu impuls normal de 1,2/50 μs.

Tensiunile de străpungere de valori mari care caracterizează hexafluorura de sulf conduc la posibilitatea diminuării apreciabile a distanțelor de izolație, comparativ cu cele întâlnite la echipamentele cu izolație în aer, cu atât mai mult cu cât gazul electroizolant se utilizează la presiuni mai mari decât cea atmosferică. In construcția echipamentelor cu gaz SF_6 se obțin astfel reduceri importante ale dimensiunilor de gabarit, cu toate avantajele aferente.

Electronegativitatea unui gaz se definește ca diferență a energiilor unei molecule neutre și a unui ion negativ. Hexafluorura de sulf are proprietăți electronegative foarte pronunțate (3,36 eV, față de numai 0,44 eV la oxigen de exemplu) și datorită lor moleculele neutre fixează cu ușurință electronii liberi, formând ioni negativi foarte stabili. In aceste condiții, densitatea electronilor liberi este mult mai mică decât în alte gaze, fapt ce explică proprietățile electroizolante excepționale ale hexafluorurii de sulf. Caracterul electronegativ al gazului se manifestă până la temperaturi înalte.

Astfel, sub 2100 K conductivitatea electrică a hexafluorurii de sulf este practic nulă. Peste această temperatură moleculele disociază în atomii componenţi şi, pe măsura creşterii temperaturii, atomii de sulf pierd electroni, formând ioni pozitivi (S^+). Electronii eliberaţi sunt însă captaţi de atomii de fluor, cu care formează ioni negativi (F^-). Contribuţia ionilor negativi de fluor la conductanţa electrică a plasmei este nesemnificativă, deoarece aceştia au mobilitate foarte redusă. Abia la temperaturi de peste 4000 K caracterul electronegativ pierde din intensitate şi densitatea electronilor creşte, mărind conductanţa gazului.

La scăderea temperaturii, regenerarea hexafluorurii de sulf începe de la valoarea de 6000 K, sub care atomii de fluor captează electronii liberi, formând ioni negativi care sunt de 185 ori mai lenţi; cu fiecare electron astfel captat, conductanţa plasmei scade practic de 185 ori. Intre 6000...3000 K toţi electronii liberi sunt captaţi, rămânând ca purtători de sarcină doar ionii (S^+), (F^-), grei şi cu mobilitate foarte redusă; ca urmare, conductanţa coloanei arcului electric scade brusc.

Un mediu electroizolant posedă bune proprietăţi pentru stingerea arcului electric dacă, la trecerea prin zero a intensităţii curentului, coloana arcului se caracterizează printr-o conductanţă electrică având valori cât mai mici şi cât mai rapid descrescătoare în timp. Potrivit relaţiilor (1.31), (1.33), îndeplinirea acestor condiţii presupune valori oricât de mici pentru constanta de timp T_a arcului electric. In acest scop, ţinând seama şi de relaţiile (1.36), (1.37), este necesar ca diametrul coloanei arcului electric de deconectare să fie cât mai redus, iar difuzivitatea a_θ, corespunzătoare gazului care constituie mediul de stingere, să aibă valori mari.

Deoarece conductivitatea termică λ şi căldura specifică c variază aproape după aceeaşi lege cu temperatura T a gazului, difuzivitatea a_θ are valori slab dependente de temperatură; atât pentru aer cât şi pentru hexafluorura de sulf, rezultă $a_\theta = 7.10^{-3}$ m^2/s, [22].

Astfel, valorile constantei de timp T_a a arcului electric, date de relaţia (1.36), se obţin practic proporţionale cu suprafaţa secţiunii transversale a arcului electric, considerată circulară de rază r_0 în

zona centrală a coloanei, caracterizată prin conductivitate electrică de valori mari. Conform modelului cilindric al arcului, [14], [22], coloana acestuia se consideră constituită din două zone cilindrice coaxiale, una de rază r_0, în care există conducție electrică și termică, iar cea de a doua de rază $R>r_0$, caracterizată numai prin procese de conducție termică.

Căldura degajată în zona centrală a coloanei se transmite prin conducție, pe direcție radială r spre exterior, fenomen descris de legea lui Fourier:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr}, \qquad (3.\ 4)$$

unde λ este conductivitatea termică a plasmei, iar T-temperatura acesteia.

Comparând sub raportul transmisiei termice două gaze diferite, se ajunge la concluzia că, la aceeași densitate a fluxului termic, gazul cu conductivitate termică mai mică se caracterizează printr-un gradient radial de temperatură de valori mari, deci printr-o rază redusă a suprafeței transversale a coloanei arcului electric.

Intr-adevăr, dacă se compară din acest punct de vedere aerul atmosferic cu hexafluorura de sulf, considerând constantă densitatea q a fluxului termic de transmisie, rezultă:

$$\left[\lambda \frac{dT}{dr}\right]_{aer} = \left[\lambda \frac{dT}{dr}\right]_{SF_6} = \text{const}. \qquad (3.5)$$

In Fig.3.6 este reprezentată dependența în raport cu temperatura a conductivității termice în hexafluorură de sulf, respectiv în azot, element preponderent al aerului, [14].

Căldura degajată în nucleul coloanei arcului se transmite prin conducție pe direcție radială, spre exterior. Potrivit relației (3.5), căderea de temperatură pe direcția de transmisie a căldurii este cu atât mai mare cu cât conductivitatea termică are valori mai mici. Așa se face că în hexafluorura de sulf temperatura scade

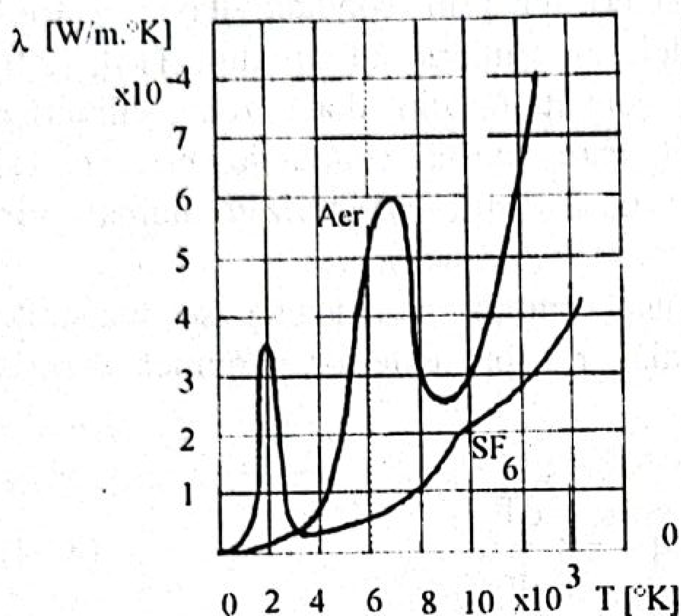


Fig.3.6

Conductivitatea termică

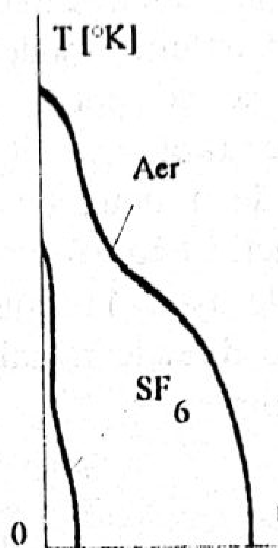


Fig.3.7

Temperatura arcului

rapid după direcţia r a razei coloanei arcului, pe când în aer această scădere este lentă, cum se arată în Fig.3.7.

Valorile de maximum ale curbelor λ(T) corespund unor fenomene de disociere în atomi a moleculelor de gaz; temperatura de disociere are valorile de 2100 K în hexafluorură de sulf şi circa 7000 K în aer. Atomii rezultaţi în urma disocierii, produse în zona axială a nucleului, difuzează către periferia acestuia unde, la temperaturi mai mici, se recombină formând molecule.

In aer, Fig.3.7, temperatura de disociere este mai mare decât cea de ionizare, astfel încât particulele neutre care ajung în stratul superficial sunt supuse fenomenului de ionizare termică şi prin şoc. In prezenţa purtătorilor de sarcină astfel rezultaţi, coloana arcului electric are o bună conductivitate chiar la distanţe mari de axă, în stratul superficial.

In hexafluorură de sulf conducţia electrică încetează practic la temperaturi sub 2100 K, deci la distanţe mici de axa coloanei arcului; stratul superficial este electroizolant.

Capacitatea de întrerupere a unui mediu de stingere este dată de evoluţia conductanţei arcului electric în vecinătatea momentelor anulării intensităţii curentului; mediului ideal îi corespunde o trecere bruscă a conductanţei de la valori ridicate (mediu conductor, plasmă) la valoarea zero (mediu electroizolant).

La scăderea intensităţii curentului, temperatura nucleului scade şi, în hexafluorură de sulf, electronii sunt captaţi datorită caracterului electronegativ al gazului. In momentul anulării

intensităţii curentului, nucleul practic dispare şi gazul devine electroizolant

In cazul arcului electric amorsat în aer, chiar dacă nucleul dispare la trecerea prin zero a intensităţii curentului, stratul superficial rămâne în continuare ionizat.

Deoarece răcirea volumului mare de gaz cu temperatură ridicată se face lent, viteza de refacere a rigidităţii dielectrice este relativ mică, stingerea definitivă a arcului electric obţinându-se astfel mai greu.

In aceste condiţii, la valori momentane mici ale intensităţii curentului, valorile măsurate ale constantei de timp a arcului electric variază în jurul a 100 µs în aer şi 0,25 µs în hexafluorură de sulf, fapt ce-i conferă acestui gaz o capacitate de stingere mult sporită, [11], [19].

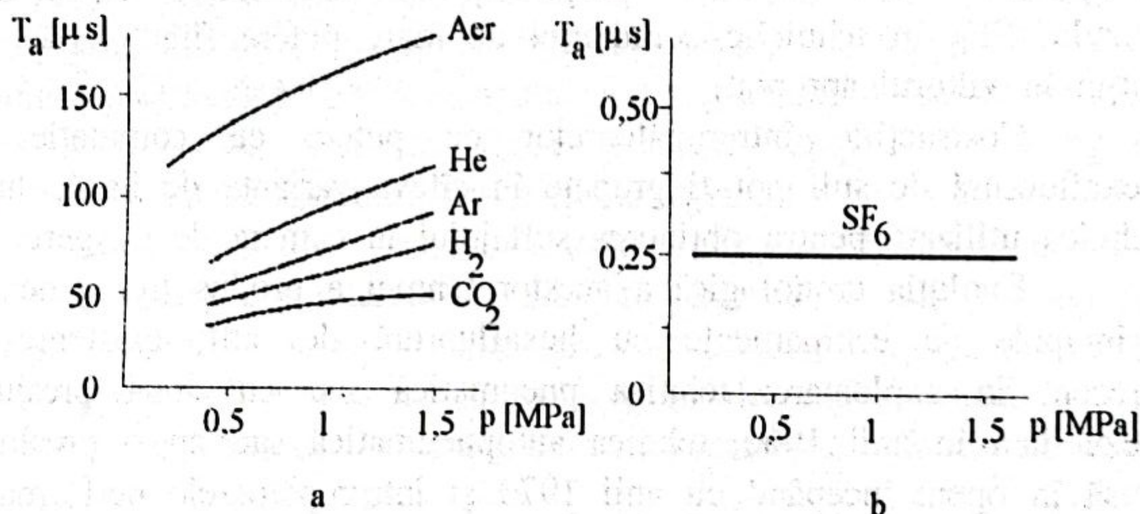


Fig.3.8

Constanta de timp a arcului electric: a-în diferite gaze; b-în SF_6.

Dependenţa în raport cu presiunea a constantei de timp a arcului electric amorsat în diferite gaze (Fig.3.8), evidenţiază valorile mici şi constante ale acesteia în hexafluorura de sulf, [19]; în celelalte gaze, avantajul creşterii tensiunii de străpungere odată cu presiunea este diminuat de creşterea valorilor constantei de timp, fapt care impune creşterea eficienţei mijloacelor deionizante.

In concluzie, proprietăţile excepţionale, ca mediu electroizolant şi de stingere a arcului electric, ale gazului SF_6 pot fi rezumate astfel:

-gaz electroizolant de mare rigiditate dielectrică, înregistrată chiar la presiuni relativ scăzute (0,15...0,4 MPa);

-excelent fluid extinctor, capabil să transporte o mare cantitate de căldură (entalpie de valori mari) care, înainte de trecerea prin zero a intensității curentului, permite răcirea arcului electric prin conducție termică radială pentru ca, în momentul anulării curentului, datorită proprietăților puternic electronegative, să permită refacerea rapidă a rigidității dielectrice a spațiului dintre contacte.

Proprietățile dielectrice și de mediu de stingere a arcului electric care caracterizează hexafluorura de sulf nu se regăsesc reunite la nici un alt fluid cunoscut.

Numeroase cercetări conduc la părerea că, [19], este puțin probabil să fie descoperite alte medii, superioare sau măcar comparabile sub raportul proprietăților menționate, supremația gazului SF_6 în tehnicile comutației de mare putere fiind certă, cel puțin în viitorul apropiat.

Costrucțiile întrerupătoarelor de putere cu comutație în hexafluorură de sulf pot fi grupate în cîteva variante de bază, după tehnica utilizată pentru obținerea suflajului în camera de stingere.

Evoluția cronologică a acestor tehnici a produs trei generații principale de echipamente cu hexafluorură de sulf, existente în prezent în exploatare: tehnica pneumatică sau cu două presiuni, dezvoltată în anii 1960, tehnica autopneumatică sau cu o presiune, pusă în operă începând cu anii 1970 și întrerupătoarele performante de înaltă și foarte înaltă tensiune, realizate după anii 1980.

Trebuie subliniat că această etapizare este cu totul schematică, deoarece nu include rezultatele, de multe ori spectaculoase, obținute în realizarea aparatajului de comutație cu hexafluorură de sulf destinat instalațiilor de medie tensiune, cuprinzând o și mai bogată varietate de tehnici (autoexpansiune, suflaj magnetic, tehnici combinate, autocompresie asistată de autoexpansiune etc.) cu tendință de evoluție spre nivele superioare de tensiune. La acestea se adaugă conceperea, proiectarea, construcția și introducerea în exploatare a instalațiilor capsulate cu izolație în hexafluorură de sulf.

3.2. Tehnica pneumatică

Pionieratul în dezvoltarea tehnicilor de comutaţie în hexafluorură de sulf revine firmelor americane. Producţia industrială a acestui gaz a început în SUA în anul 1947 şi tot aici, în 1953, s-a propus pentru prima dată utilizarea sa în realizarea tehnicii de comutaţie destinate instalaţiilor de mare putere, [30]; în 1959, firma Westinghouse realizează, în tehnică pneumatică, primele întrerupătoare cu hexafluorură de sulf.

In construcţiile de acest tip, stingerea arcului electric se face prin suflarea cu hexafluorură de sulf comprimată la presuni relativ ridicate, principiu împrumutat de la întrerupătoarele cu aer comprimat [7], [12], [16], [23]. Circuitul de gaz este închis şi conţine două rezervoare, de joasă presiune (circa 0,3 MPa), respectiv de înaltă presiune (1,5 MPa), între care este amplasat un compresor. Datorită acestui aranjament, echipamentele realizate în tehnică pneumatică sunt cunoscute ca funcţionând cu două presiuni. Hexafluorura de sulf la joasă presiune umple în întregime construcţia întrerupătorului, realizând izolaţia internă.

La deconectare, gazul stocat în rezervorul de înaltă presiune străbate ajutajele camerei de stingere exercitând suflajul necesar stingerii arcului electric, după care se destinde în rezervorul de joasă presiune. Presiunea în rezervorul de înaltă presiune este refăcută prin intrarea în funcţiune a compresorului de hexafluorură de sulf.

Construcţiile de acest tip, ca de altfel şi cele din generaţiile următoare, sunt realizate în două variante, cunoscute în literatură sub denumirile de dead-tank, respectiv live-tank, diferite prin modul de realizare a izolaţiei căilor conductoare faţă de pământ.

Un întrerupător de tip dead-tank are partea activă a polului închisă într-o cuvă metalică funcţionând la potenţialul pământului, umplută cu gaz SF_6 la joasă presiune, cu rol de realizare a izolaţiei. Ieşirile la bornele de conexiune cu exteriorul se fac prin izolatoare de trecere pe care, în unele cazuri, sunt amplasate transformatoare de curent. Acest aranjament are multe elemente comune cu cel întâlnit la întrerupătoarele cu ulei mult şi la unele variante de întrerupătoare cu aer comprimat.

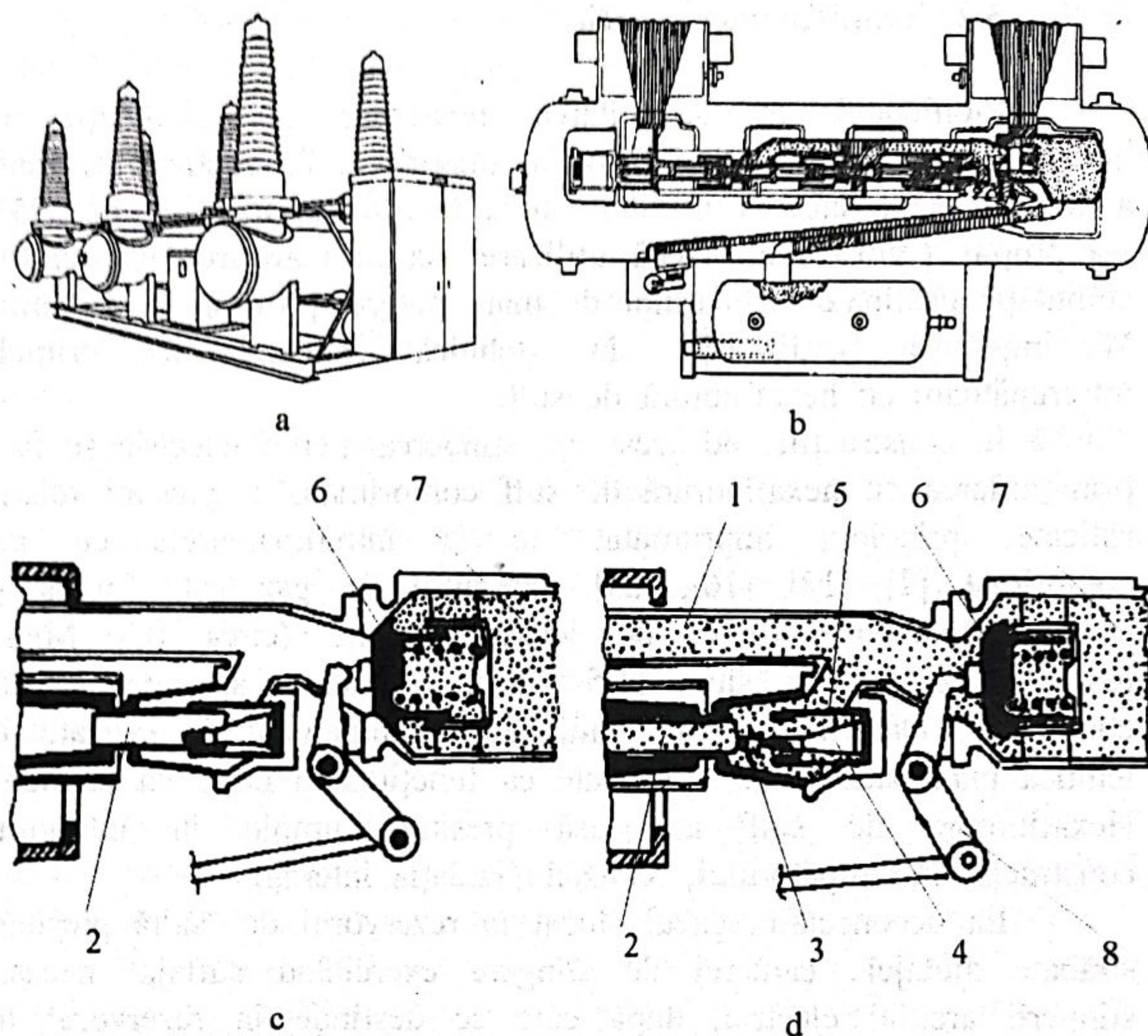


Fig.3.9

Intrerupător dead-tank în tehnică pneumatică: a-ansamblu; b-secțiune prin pol; c, d-schițe funcționale.

Pentru exemplificare, în Fig.3.9a,b se prezintă schița de ansamblu și secțiunea transversală printr-un întrerupător dead-tank realizat de Westinghouse Electric Corporation-SUA, destinat instalațiilor de 220 kV; cu trei locuri de întrerupere pe pol (Fig.3.9b), aparatul poate deconecta curenți de scurtcircuit de până la 40 kA, [11], [30].

Construcția unei camere de stingere este reprezentată detaliat în Fig.3.9c,d.

Indiferent de starea închisă sau deschisă a contactelor întrerupătorului, Fig.3.9c, supapa 6 este închisă astfel încât, în aval de aceasta, gazul se află la joasă presiune.

La deconectare, Fig.3.9d, contactul mobil tubular 2 părăsește contactul fix de lucru 5 și extremitatea arcului electric 3 este imediat preluată de contactul fix de rupere 4. In acest moment, prin transmisia electroizolantă 8, se comandă deschiderea supapei 6 și, pe o durată foarte scurtă, hexafluorura de sulf aflată la înaltă presiune în compartimentul 7, este admisă în zona contactelor. Se obține astfel un suflaj longitudinal unilateral intens, care produce stingerea arcului electric. Prin conducta electroizolantă 1, gazul sub presiune este dirijat spre următoarea cameră de stingere modul.

Hexafluorura de sulf utilizată pentru exercitarea suflajului este apoi filtrată cu ajutorul unor elemente active din alumină și recomprimată la valoarea presiunii înalte de funcționare a întrerupătorului.

In construcțiile de tip live-tank izolația față de pământ se obține cu o coloană electroizolantă din porțelan, care susține camera de stingere. Se exemplifică tehnica pneumatică prin întrerupătoarele de înaltă tensiune tip SFA (Westinghouse Electric Corporation-SUA), având intensitatea curentului nominal de 2000 A și capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit de 63 kA.

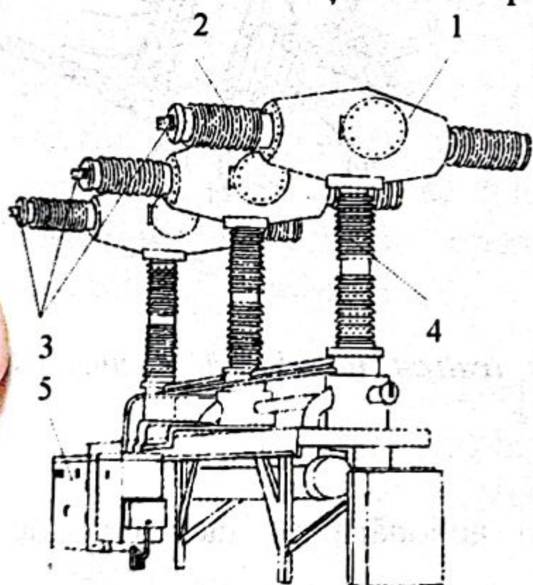


Fig.3.10
Intrerupător live-tank în tehnică pneumatică

Construcția întrerupătorului, corespunzătoare unei tensiuni nominale de 362 kV, este prezentată în Fig.3.10. Notațiile utilizate au următoarele semnificații: 1-cameră de stingere modul, 2-izolator de trecere, 3-borne de conexiuni, 4-izolator suport, 5-compresor de hexafluorură de sulf, 6-rezervor cu gaz SF_6 la presiune înaltă.

Camera de stingere modul, Fig.3.11a, este constituită din incinta metalică 1, în care este amplasată întreaga construcție, funcționând în hexafluorură de sulf la presiunea p_2, de 0,4 MPa.

Calea de curent conține tijele 2 ale izolatoarelor de trecere 3, terminate la exterior cu bornele de conexiuni, iar în interior cu

contactele fixe tubulare 4. Tensiunile pe cele două locuri de întrerupere înseriate pe pol sunt uniformizate cu ajutorul condensatoarelor 5, conectate fiecare în paralel cu câte un contact.

Acţionarea întrerupătorului se obţine pe seama energiei acumulate în bara de torsiune 8, mişcarea fiind transmisă la

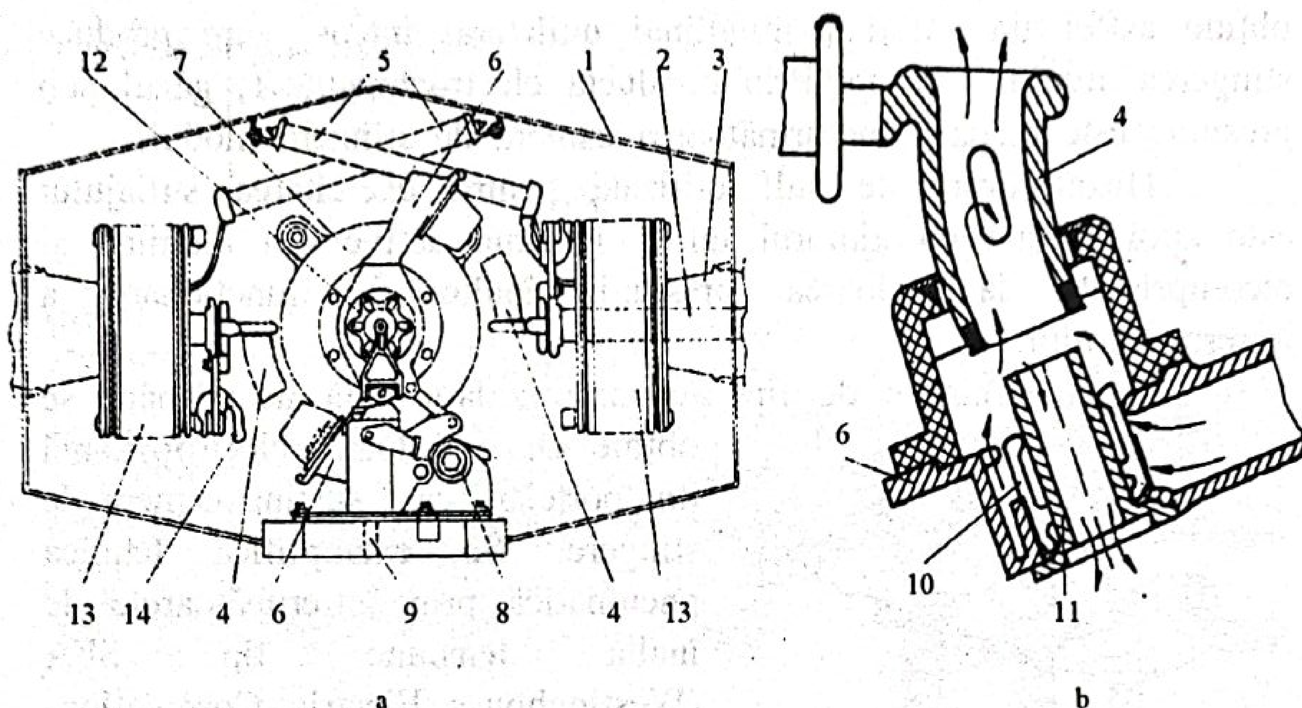


Fig.3.11

Partea activă a unui întrerupător live tank realizat în tehnică pneumatică: a-camera de stingere; b-sistemul de contacte.

contactele mobile rotative 6. Comanda acţionării se face pe cale mecanică, prin intermediul tijei 9.

In poziţia închis, contactele de lucru (Fig.3.11b) se stabilesc între suprafaţa exterioară piesei tubulare 4 a contactului fix şi degetele de contact 10, dispuse pe circumferinţa piesei tubulare 11 a contactului mobil.

Pentru deconectare se comandă acţionarea contactului mobil 6, care execută o mişcare de rotaţie de circa 40^{o}, simultan cu care se deschide valva 12 (Fig.3.11a), prin care se face admisia hexafluorurii de sulf din rezervorul de înaltă presiune 7, în incinta 1. După separarea contactelor 4, 10, stingerea arcului electric de deconectare se obţine sub acţiunea suflajului intens cu hexafluorură de sulf (Fig.3.11b), care se destinde de la presiunea p_1, de 1,7

MPa (existentă în rezervorul auxiliar 7, Fig.3.11a), la presiunea p_2. Extremităţile arcului electric se sprijină pe suprafeţele interioare ale pieselor tubulare de contact 4, 11, suprafaţa contactului de lucru fiind astfel protejată la electroeroziune.

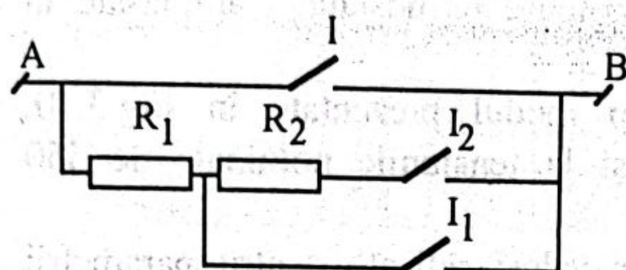


Fig.3.12
Rezistenţe de şuntare

Ca şi în cazul întrerupătoarelor cu aer comprimat, limitarea supratensiunilor de comutaţie este posibilă prin utilizarea unor rezistoare liniare de şuntare a contactelor principale, [11]; schema electrică de principiu este dată în Fig.3.12.

La deconectare, se deschid mai întâi contactele principale I de pe calea de curent A-B a polului, urmate în ordine de contactele auxiliare I_1, I_2; în acest fel, rezistenţa introdusă în circuitul deconectat creşte secvenţial la valorile R_1, (R_1+R_2), după care are loc întreruperea completă a circuitului. Acest mod de funcţionare conferă tensiunii tranzitorii de restabilire un caracter aperiodic, cu valori relativ scăzute ale factorului de oscilaţie.

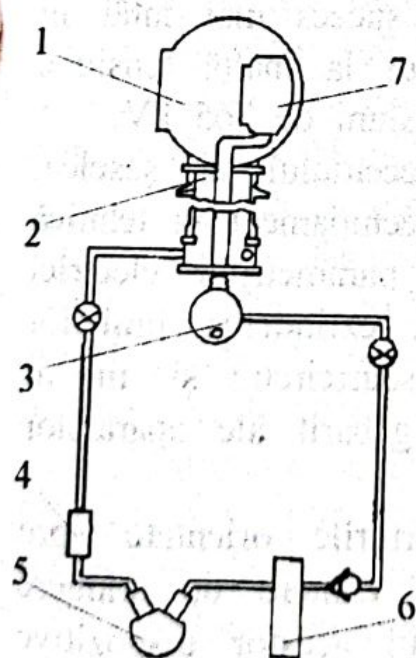


Fig.3.13
Circuitul principal de gaz

Rezistoarele de şuntare şi contactele auxiliare sunt amplasate în camera de stingere (Fig.3.12a) corespunzător reperelor 13, 14.

Circuitul principal de gaz SF_6, închis şi funcţionând la cele două presiuni, este reprezentat în Fig.3.13. Gazul la presiunea joasă asigură izolaţia atât în camera de stingere modul 1, cât şi în coloana suport electroizolantă 2; hexafluorura de sulf la presiune înaltă este stocată în rezervoarele principal 3 şi auxiliar 7. După funcţionarea întrerupătorului, presiunea în rezervoare este readusă la valoarea nominală prin intrarea în funcţiune a compresorului 5. Pentru reţinerea fluorurilor rezultate din

descompunerea gazului SF_6 sunt prevăzute filtrele 4 (de joasă presiune) și 6 (de înaltă presiune), ambele realizate din alumină (Al_2O_3). Lichefierea nedorită a hexafluorurii de sulf la scăderea temperaturii mediului este preîntâmpinată prin punerea în funcțiune a unor elemente de încălzire cu rezistoare termostatate, amplasate în pereții electroizolanți ai rezervorului 3.

Pe baza construcției de tip modul prezentate în Fig.3.10, întrerupătoarele SFA sunt extinse și la tensiunile nominale de 550 și 800 kV, [2].

Deși permite obținerea unor valori ridicate pentru parametrii electrici, tehnica pneumatică sau cu două presiuni are o serie de inconveniente, dintre care se menționează: prezența compresorului necesar recomprimării gazului, riscul unei rate ridicate a pierderilor de gaz, necesitatea unor dispozitive suplimentare de încălzire în construcția echipamentelor de exterior pentru prevenirea lichefierii.

3.3. Tehnica autopneumatică

Tehnica suflajului autopneumatic (puffer circuit breakers), preconizată de GEC Alsthom și aplicată cu succes mai întâi în instalațiile de medie tensiune (1958) și apoi la înaltă tensiune (1966) a fost progresiv generalizată pînă la tensiuni de 765 kV.

Incepând cu a doua jumătate a deceniului al șaselea, competiția între marile firme producătoare de echipament în tehnică autopneumatică are drept obiective creșterea parametrilor electrici (valori nominale pentru tensiune și curent), extinderea limitelor superioare ale capacității de deconectare la scurtcircuit și, nu în ultimul rând, micșorarea dimensiunilor de gabarit ale aparatelor produse.

In acest context se înscriu și eforturile orientate spre realizarea unor construcții tipizate, utilizând camere de stingere modul, cu tendința de reducere a numărului acestor dispozitive înseriate pe pol.

Evoluția cronologică a capacității de deconectare la scurtcircuit și a tensiunii pe camera de stingere modul a

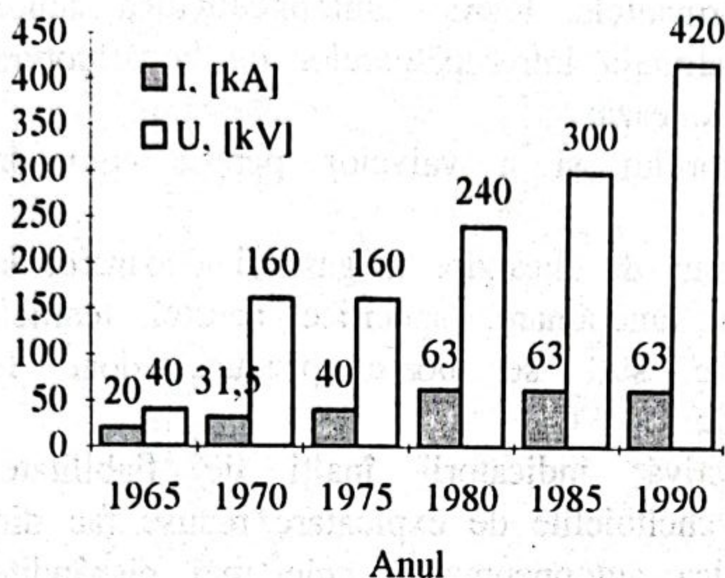


Fig.3.14
Evoluția capacității de deconectare și a tensiunii pe camera de stingere modul

întrerupătoarelor tip autopneumatic de înaltă tensiune este ilustrată în Fig.3.14, [30].
Datorită perfecționărilor, bazate în special pe cunoașterea și modelarea mai precisă a fenomenelor de comutație [8], [10], [28] și pe experiența acumulată de laboratoarele marilor firme, s-a ajuns la punerea la punct a tehnicii bazate pe principiul camerei de stingere modul, care permite realizarea unor serii unitare de aparate.

In acest sens [24], se menționează întrerupătoarele tip FX, cu tensiuni nominale de la 72,5 la 800 kV.

Aparatele de 245 kV funcționează cu întrerupere unică pe pol, în timp ce FX 550 și FX 800 kV au numai două sau trei, respectiv trei sau patru camere de stingere modul înseriate pe pol reprezentând, evident, tot atîtea locuri de întrerupere.

Tehnica autopneumatică a fost adoptată de constructori și acceptată de utilizatori deoarece permite obținerea unor performanțe electrice înalte, cum sunt: capacitate de deconectare la scurcircuit atingând 63 kA, tensiune nominală de până la 800 kV, timp de deconectare de valori mici (circa 40 ms).

Intrerupătoarele de putere realizate în tehnică autopneumatică [7], [14], [16], [20], [23] funcționează cu hexafluorură de sulf la o singură presiune, având valori de 0,5...0,7 MPa.

Suflajul necesar activării stingerii arcului electric se obține la deconectare prin autocompresie, pe durata deplasării echipajului mobil. Aceste întrerupătoare se mai numesc cu autocompresie sau cu o singură presiune (monopresiune).

Fără a afecta performanțele, tehnica autopneumatică aduce simplificări notabile în construcția întrerupătoarelor cu hexafluorură de sulf, dintre care se menționează:

-eliminarea compresorului și a valvelor pentru comanda suflajului;

-renunțarea la sistemul de încălzire a gazului deoarece, la presiunile mai scăzute de funcționare, specifice acestei tehnici, lichefierea hexafluorurii de sulf se poate produce doar la temperaturi foarte scăzute, de -40 ^{o}C.

Simplitatea constructivă, indicatorii înalți de fiabilitate, mentenabilitatea ridicată și cheltuielile de exploatare reduse fac din aparatele realizate în tehnica autopneumatică cele mai răspândite dintre cele cu comutație în hexafluorură de sulf.

Aparatele autopneumatice de înaltă tensiune cu comutație în hexafluorură de sulf sunt de tip monopolar, realizate obișnuit în variată live-tank (cu camere de stingere izolate față de pământ prin coloane electroizolante).

Pentru domeniul tensiunilor foarte înalte și al capacităților de rupere mari, se fabrică aparate de tip dead-tank, prevăzute cu anvelopă exterioară metalică, funcționând la potențialul pământului. Intrerupătoarele de medie tensiune, fără excepție, sunt realizate în construcție tripolară.

3.3.1. Intrerupătoare de înaltă tensiune

Se exemplifică tehnica autopneumatică de înaltă tensiune prin întrerupătorul tip LWE (Westinghouse Electric Corporation, SUA), având parametrii nominali 362 kV/2000-2500-3000 A/63 kA; arhitectura unui pol este reprezentată în Fig.3.15, [1], [2].

Construcția este constituită din camerele de stingere modul 1, prevăzute cu rezistoarele de șuntare 2 și din coloana electroizolantă 3; întreaga construcție este amplasată pe șasiul metalic 4, pe care se găsește și dispozitivul pneumatic de acționare 5, prevăzut cu rezervorul 6, de aer comprimat.

Partea activă a întrerupătorului, formată din camerele de stingere și sistemul de contacte, este reprezentată în Fig.3.16.

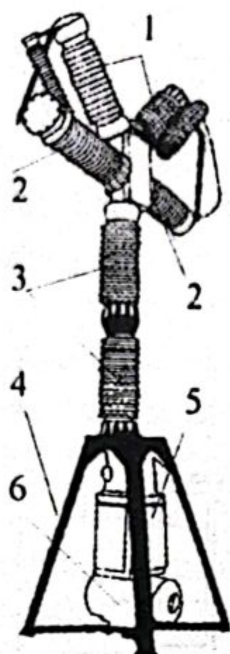


Fig.3.15
Intrerupător autopneumatic LWE (WEC SUA)

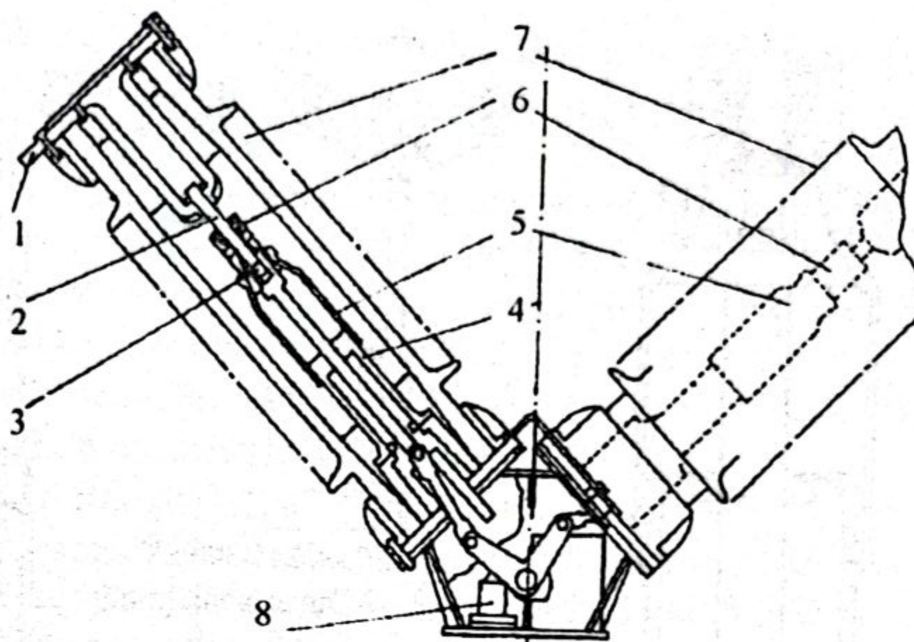


Fig.3.16
Partea activă a polului

Calea de curent a unui pol conține bornele de conexiuni 1, contactele fixe 2 și contactele mobile 3.

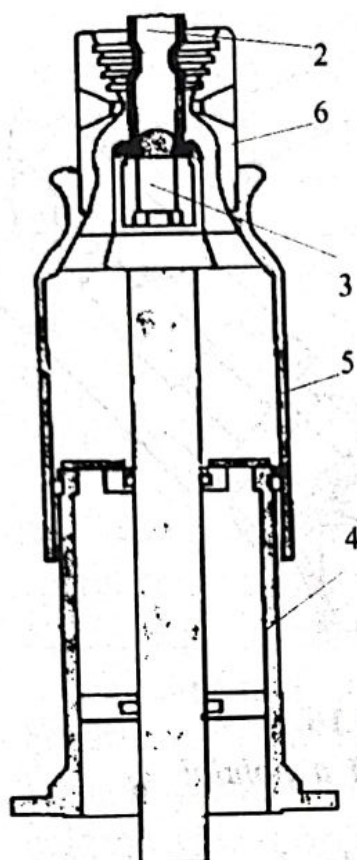
Sistemul autopneumatic este constituit din pistonul fix 4 care acționează în interiorul cilindrului mobil 5, solidar cu contactul mobil 3; cilindrul 5 este prevăzut, în zona contactului, cu ajutajul electroizolant 6.

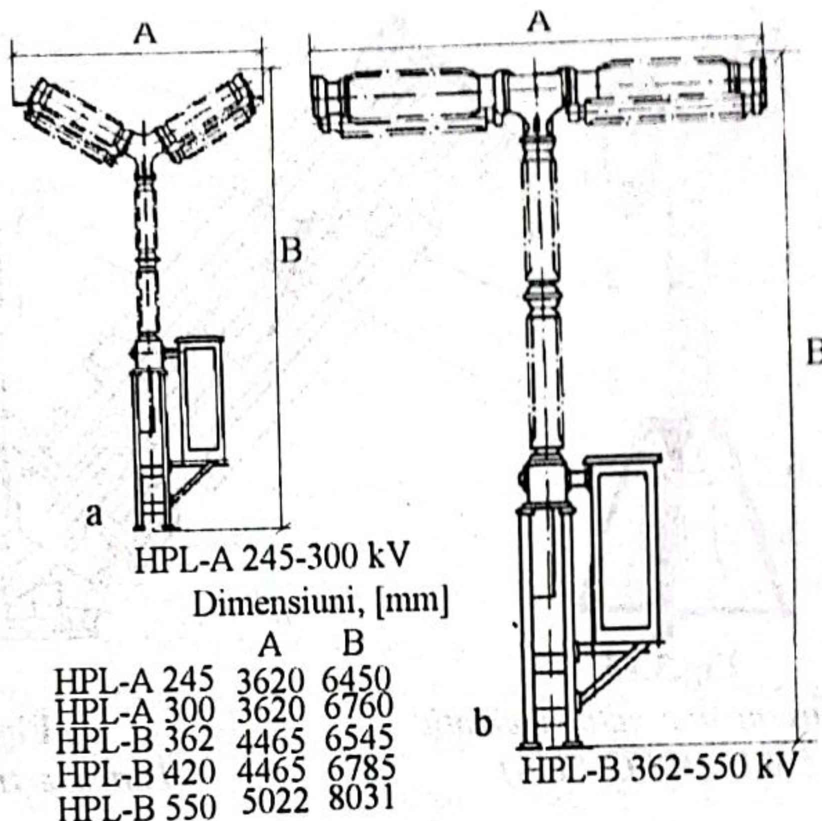
Construcția este protejată și etanșată în anvelopa de porțelan 7, conținând hexafluorură de sulf la presiunea de 0,5 MPa; la aceeași presiune, gazul se găsește și în coloana electroizolantă 3, Fig.3.15. Transmisia mișcării de la dispozitivul de acționare la contactele mobile se face prin intermediul tijei 8.

Funcționarea camerei de stingere în sistem autopneumatic poate fi urmărită în Fig.3.17. Cu întrerupătorul închis, conducția este asigurată prin contactul electric realizat între piesa 2 a contactului tubular fix și contactul mobil 3. Presiunea gazului, atât în interiorul cât și în exteriorul cilindrului 5, are aceeași valoare.

La deschiderea întrerupătorului, prin deplasarea tijei contactului mobil, contactele 2, 3 se separă și între ele se amorsează arcul electric de deconectare.

Simultan cu contactul mobil 3, fiind solidare cu acesta, se deplasează cilindrul 5 și ajutajul electroizolant 6.





Dimensiuni, [mm]

	A	B
HPL-A 245	3620	6450
HPL-A 300	3620	6760
HPL-B 362	4465	6545
HPL-B 420	4465	6785
HPL-B 550	5022	8031

Fig.3.17
Ansamblu cameră de stingere

Fig.3.18
Intrerupătoare autopneumatice de fabricație ABB: a-HPL-A; b-HPL-B.

Ca urmare, hexafluorura de sulf dintre pistonul fix 4 și cilindrul mobil 5 este comprimată, gazul fiind dirijat prin ajutajul 6, în suflaj asupra coloanei arcului.

In cazul întreruperii curenților de scurtcircuit, suprafața secțiunii transversale a coloanei arcului are valori mari, ocupând aproape integral ajutajul camerei de stingere; acesta este fenomenul de refulare a arcului electric, cunoscut și ca efect de dop sau bușon.

Fenomenul este benefic [32] deoarece, fiind intens la valori instantanee mari ale curentului, permite rezervarea gazului comprimat înainte de momentul anulării intensității curentului când, prin eliberarea ajutajului, se exercită suflajul necesar stingerii arcului.

Același efect conduce la micșorarea energiei arcului deoarece, prin frânarea mecanică a echipajului mobil al întrerupătorului, lungimea maximă, atinsă de coloana arcului în

momentul stingerii definitive, este limitată. In cazul curenților de mică intensitate, efectul de dop este slab încât, la aceeași viteză de deplasare a echipajului mobil, intensitatea suflajului scade. Se înlătură astfel riscul unor întreruperi cu tăiere (smulgere) de curent, soldate cu supratensiuni de comutație de valori mari.

Pistonul fix 4 este prevăzut cu valve, închise pe durata deplasării la deschidere a întrerupătorului, dar care se deschid pe parcursul închiderii acestuia, astfel încât gazul de sub cilindrul mobil 5 să poată fi împrospătat prin recirculare.

In Europa, ABB [37], [38], [41] fabrică aparate din aceeași categorie, pentru instalații de înaltă tensiune. Se citează seriile tip HPL-A (72,5 ...300 kV, 4000 A/63 kA), HPL-B (245-550 kV, 2500-4000 A/31,5-50 kA), acționate cu mecanism cu resorturi și ELF SP (245...765 kV, 4000 A/63 kA), cu acționare hidromecanică; performanțele acestor aparate se concretizează prin realizarea construcției cu cel mult două camere de stingere modul pe pol, Fig.3.18.

Intrerupătoarele autopneumatice cu hexafluorură de sulf produse în România sunt cunoscute sub simbolizarea H 07, H 14, H 17, H 42 și se fabrică respectiv pentru gama de tensiuni nominale de 72,5-145-170-420 kV, curent nominal de 2500 (3150) A și capacitate nominală de deconectare la scurtcircuit de maximum 40 kA, [31], [44], [45].

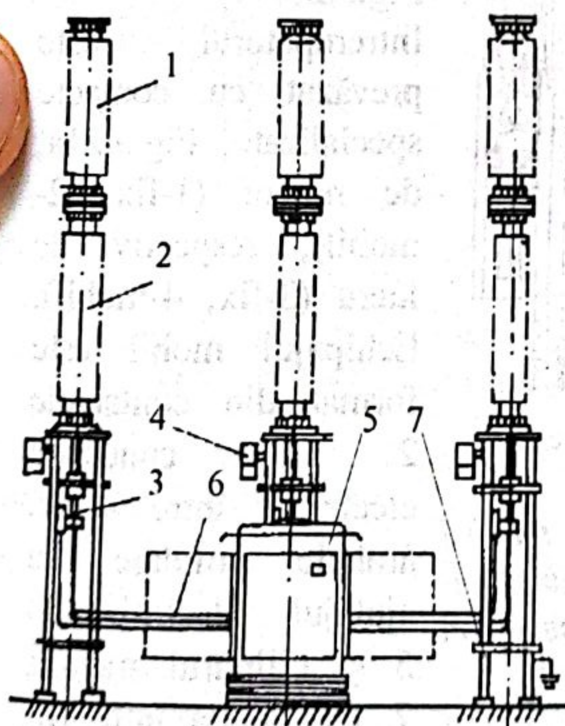


Fig.3.19
Intrerupător autopneumatic tip H (România)

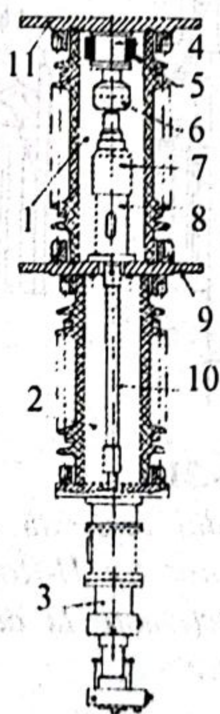


Fig.3.20
Construcția unui pol

Construcția (Fig.3.19) este constituită din trei

poli monocoloană identici şi un mecanism de acţionare cu comandă pneumatică sau oleopneumatică.

Fixarea polilor, la baza cărora sunt amplasate presostatele de control 4, se face pe suporţii metalici 7. Polii se cuplează cu mecanismul de acţionare 5 prin intermediul conductelor de înaltă presiune 6.

Fiecare pol este constituit din camera de stingere 1, coloana izolatorului suport 2, mecanismul întrerupător 3 şi tija acestuia care, străbătând coloana 2, transmite mişcarea la contactele mobile.

Detaliile constructive ale unui pol sunt reprezentate în Fig.3.20. Hexafluorura de sulf la presiunea de 0,65 MPa, existentă în anvelopele de porţelan 1, 2, corespunzătoare camerei de stingere şi respectiv izolatorului suport, realizează nivelul nominal de izolaţie internă.

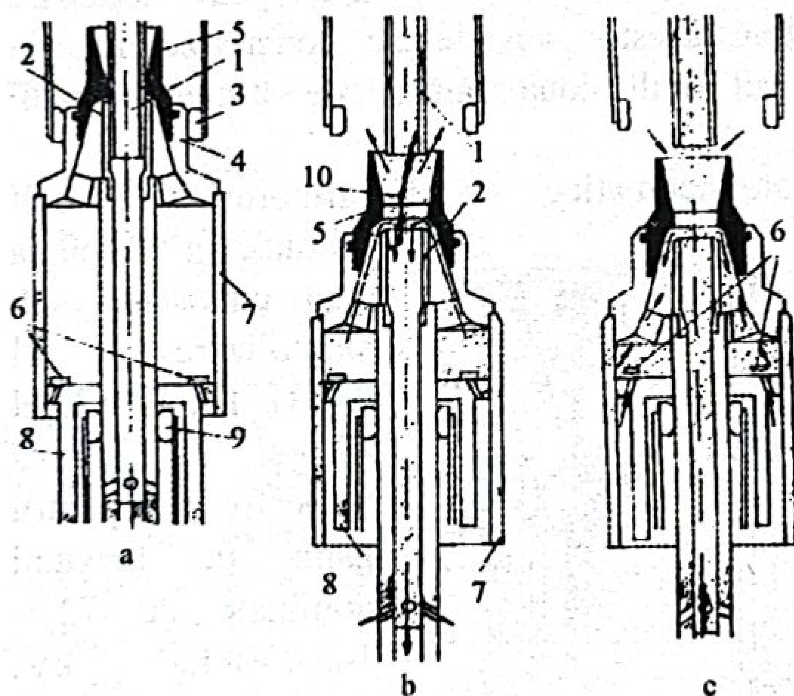


Fig.3.21

Cameră de stingere modul realizată în tehnică autopneumatică (întrerupător tip H-România): a-întrerupător închis; b-funcţionare la deconectare; c- funcţionare la conectare.

Componentele camerei de stingere şi modul de funcţionare [31], sunt prezentate în Fig.3.21.

Intrerupătorul este prevăzut cu contacte specializate, Fig.3.21a, de rupere (1-fix, 2-mobil), respectiv de lucru (3-fix, 4-mobil). Echipajul mobil este format din contactele 2, 4, conectate electric între ele, ambele solidare cu ajutajul electroizolant 5 şi cilindrul metalic 7. Conducţia între tija contactului mobil şi borna fixă de racord se stabileşte prin intermediul contactului alunecător 9. La deconectare, Fig.3.21b, echipajul mobil coboară, arcul electric 10 fiind preluat de contactele 1, 2. Hexafluorura de sulf, comprimată între cilindrul mobil 7 şi

pistonul fix 8 exercită, prin ajutajul 5, un suflaj longitudinal bilateral, orientat după săgeţile din desen. Valvele 6 se deschid la închiderea întrerupătorului (Fig.3.21c) şi permit recircularea gazului necesar pentru suflaj, conţinut în spaţiul dintre cilindrul 7 şi pistonul 8.

Controlul presiunii se face cu presostatul 4 (Fig.3.19) care are rolul fie de a semnaliza scăderea presiunii, fie de a comanda blocajul general al funcţionării sau deschiderea automată a întrerupătorului, dacă presiunea de lucru scade sub o valoare limită.

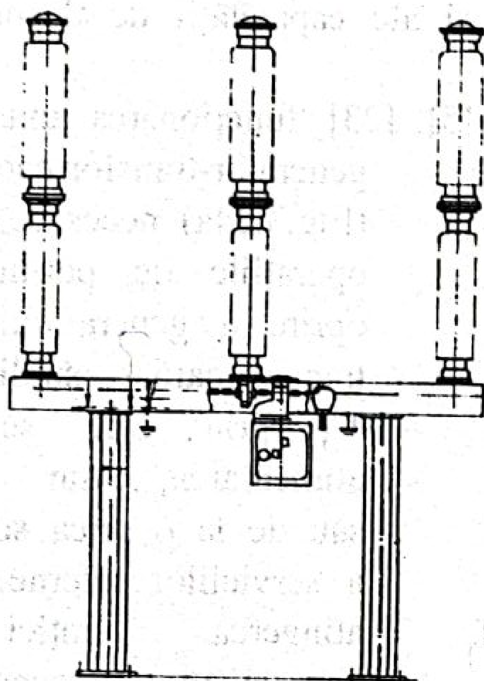


Fig.3.22
Intrerupător autopneumatic live-tank ZWAR (Polonia)

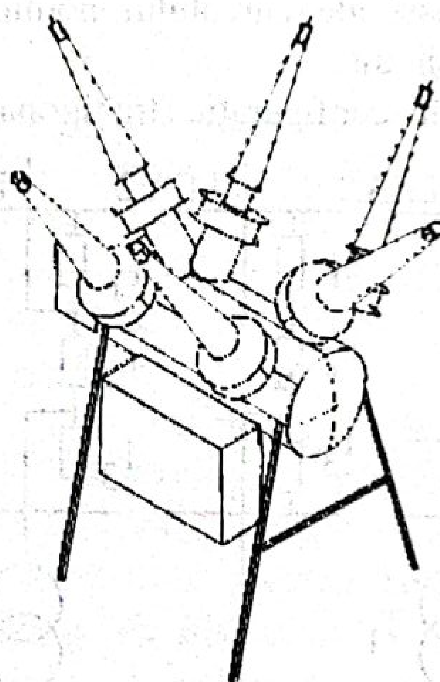


Fig.3.23
Intrerupător utopneumatic dead-tank ABB

Pe aceleaşi baze este realizat întrerupătorul de înaltă tensiune tip EDF (Fig. 3.22), de 123 (145) kV/3150 A/31,5 kA, produs al firmei ZWAR-Polonia, [39].
Pentru parametri superiori valorilor de 550 kV/4000 A/63 kA, firma ABB, [42], fabrică întrerupătoare de tip dead-tank (Fig.3.23).

In realizarea acestor aparate s-a avut în vedere satisfacerea cerinţelor privind reducerea suprafeţei ocupate în instalaţii, toate fiind testate pentru a suporta solicitări seismice severe. Izolatoarele de trecere, de tip transformator de curent, contribuie la micşorarea

gabaritelor şi oferă importante facilităţi pentru rezolvarea optimizată a instalaţiilor de protecţie prin relee.

3.3.2. Intrerupătoare de generator

Tehnica autopneumatică în hexafluorură de sulf a permis dezvoltarea construcţiilor de întrerupătoare pentru generator care, deşi funcţionează la medie tensiune, se caracterizează prin valori foarte mari ale curentului nominal şi ale capacităţii de deconectare la scurtcircuit.

In configuraţie tradiţională [5], [23] funcţionarea unui bloc generator-transformator (Fig.3.24a) necesită, pentru operaţiile de pornire sau oprire a generatorului, un transformator suplimentar T_3 prin care se face alimentarea, din sistem sau de la o reţea separată, a serviciilor interne. După atingerea turaţiei de sincronism, generatorul este conectat la sistem prin echipamentele de pe partea de înaltă tensiune a transformatorului principal T_1. Alimentarea staţiei este apoi trecută de pe transformatorul de pornire T_3, pe transformatorul de serviciu T_2.

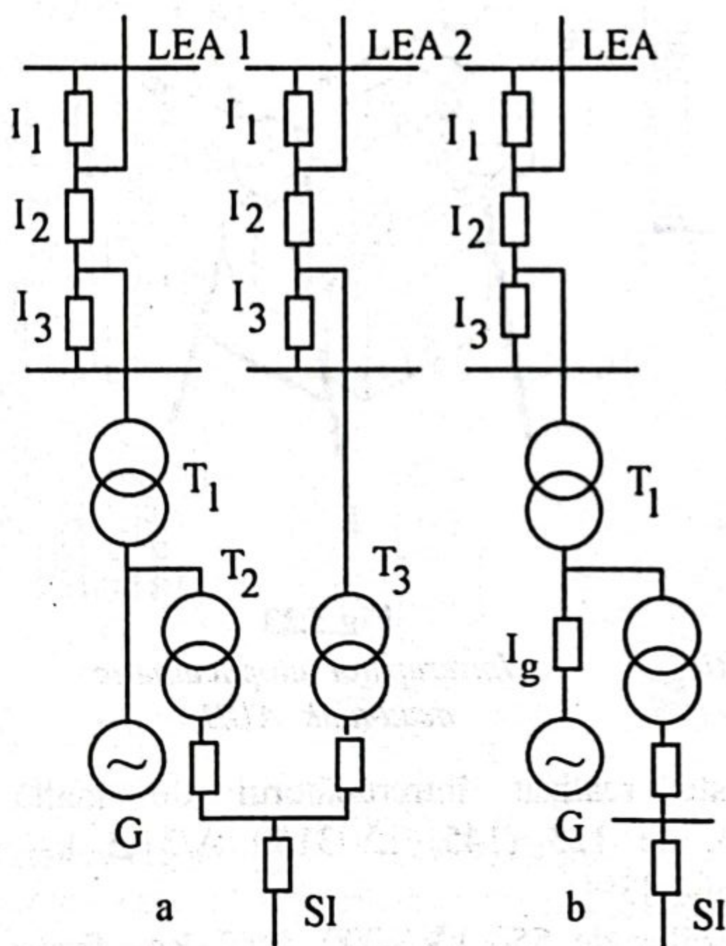


Fig.3.24

Scheme de conectare la sistem: a-bloc generator-transformator fără întrerupător de generator; b-cu întrerupător de generator.

După cum se indică în Fig.3.24b, încorporarea, între generator şi transformatorul T_1 a

întrerupătorului de generator I_g, permite circulația de putere, la pornirea sau oprirea grupului, direct prin transformatoarele T_1, T_2.

Utilizarea întrerupătoarelor de generator conduce la simplificarea funcțiilor operative în centrală (aranjament logic și simplu al întrerupătorului în circuitul principal al generatorului, reducerea numărului de manevre pe durata operațiilor de pornire-oprire, definirea clară a responsabilității manevrelor în centrală și în sistemul de înaltă tensiune), îmbunătățirea protecției generatorului și a transformatoarelor T_1, T_2 (Fig.3.24b), creșterea securității și disponibilității centralei.

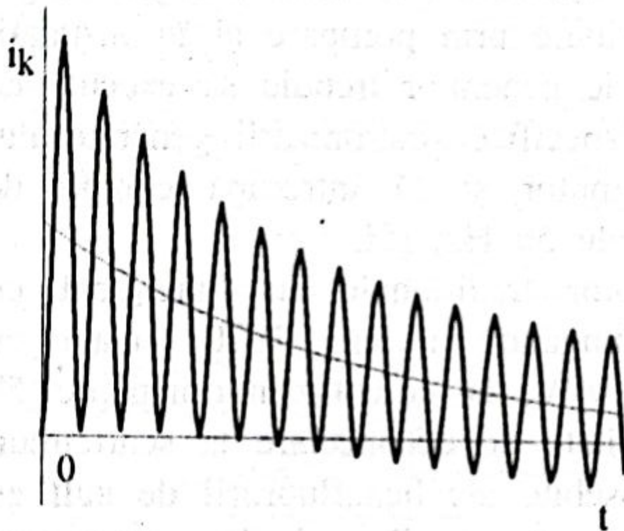


Fig.3.25

Intârzierea momentului primei anulări a intensității curentului de scurtcircuit

Protecția la scurtcircuit a generatorului este asigurată de întrerupătoarele de pe partea de înaltă tensiune a transformatorului principal T_1 sau de întrerupătorul de generator I_g.

Intreruperea defectelor și dezexcitarea generatorului trebuie să fie oricât de rapide, pentru a se preveni defectările grave ale instalației.

Funcționarea protecției trebuie totuși să țină seama de posibile întârzieri, uneori substanțiale (zeci de semiperioade, Fig.3.25) ale momentului primei anulări a intensității curentului de scurtcircuit [23], [30], produse ca urmare a suprapunerii peste componenta de curent alternativ a unei componente continue de valori mari (dependente, la rândul ei, de raportul X/R dintre reactanța generatorului și rezistența statorului).

Numai dacă rezerva de stabilitate termică a instalației permite, regimul dificil de deconectare impus întrerupătorului în acest caz poate fi evitat printr-o temporizare adecvată a momentului separării contactelor acestuia. In mod obișnuit se utilizează întrerupătoare de generator caracterizate printr-o creștere rapidă și la valori mari a rezistenței arcului electric, fapt care conduce la

micşorarea constantei de timp a circuitului şi la forţarea anulării rapide a intensităţii curentului.

Un întrerupător de generator îndeplineşte următoarele funcţii:

-operaţii de comutaţie în regimuri normale, între generator şi sistem;

-operaţii de comutaţie la conectarea în paralel, chiar fără îndeplinirea condiţiilor de fază;

-întreruperea curenţilor de scurtcircuit la defecte în zona generatorului;

-întreruperea curenţilor de scurtcircuit la defecte în sistem.

In hidrocentralele cu acumulare prin pompare şi în instalaţii cu turbine cu gaz, întrerupătorul de generator trebuie să execute de asemenea operaţiile de comutaţie specifice sincronizării generatorului funcţionând în regim de electromotor şi să întrerupă curenţi de scurtcircuit la frecvenţe mai mici de 50 Hz, [5].

Intrerupătoarele de generator tradiţionale au funcţionat cu comutaţie în aer comprimat ajungând în anii 1970, odată cu introducerea grupurilor de 1200 MW, la curentul nominal de 50 kA, căruia îi corespunde o capacitate de deconectare la scurtcircuit de 275 kA, [5]. Proprietăţile deosebite ale hexafluorurii de sulf au impus, în următorul deceniu, acest mediu şi în construcţia echipamentului de comutaţie pentru generatoare.

In funcţie de tipul centralei şi al generatorului, puterea unitară furnizată la tensiuni de 16...24 kV, variază între limitele 600...1650 MW; la aceste puteri, curentul de regim normal care traversează un întrerupător de generator poate avea intensitatea în domeniul 10...50 kA.

Curenţii de scurtcircuit au intensităţi de ordinul 50...180 kA [23], [30]. Aceste condiţii grele de exploatare, în care solicitarea complexă (regimurile termice, electrodinamice, procesele fizice şi chimice care afectează starea contactelor şi a componentelor camerei de stingere etc.) este deosebit de intensă, impun soluţii constructive speciale.

Asigurarea regimurilor termice nominale pentru căile conductoare necesită mijloace suplimentare de răcire, aceasta făcându-se, la variantele construite, prin convecţie forţată.

Regimul de lucru al contactelor, dependent de rezistenţa de contact, impune valori oricât de mici (microohmi) pentru aceasta, care pot fi obţinute doar cu materiale având caracteristici adecvate, din care se confecţionează piese de contact cu suprafeţe mărite.

Stingerea eficientă a arcului electric traversat de curenţi foarte mari presupune, de asemenea, creşterea diametrelor ajutajelor de suflaj.

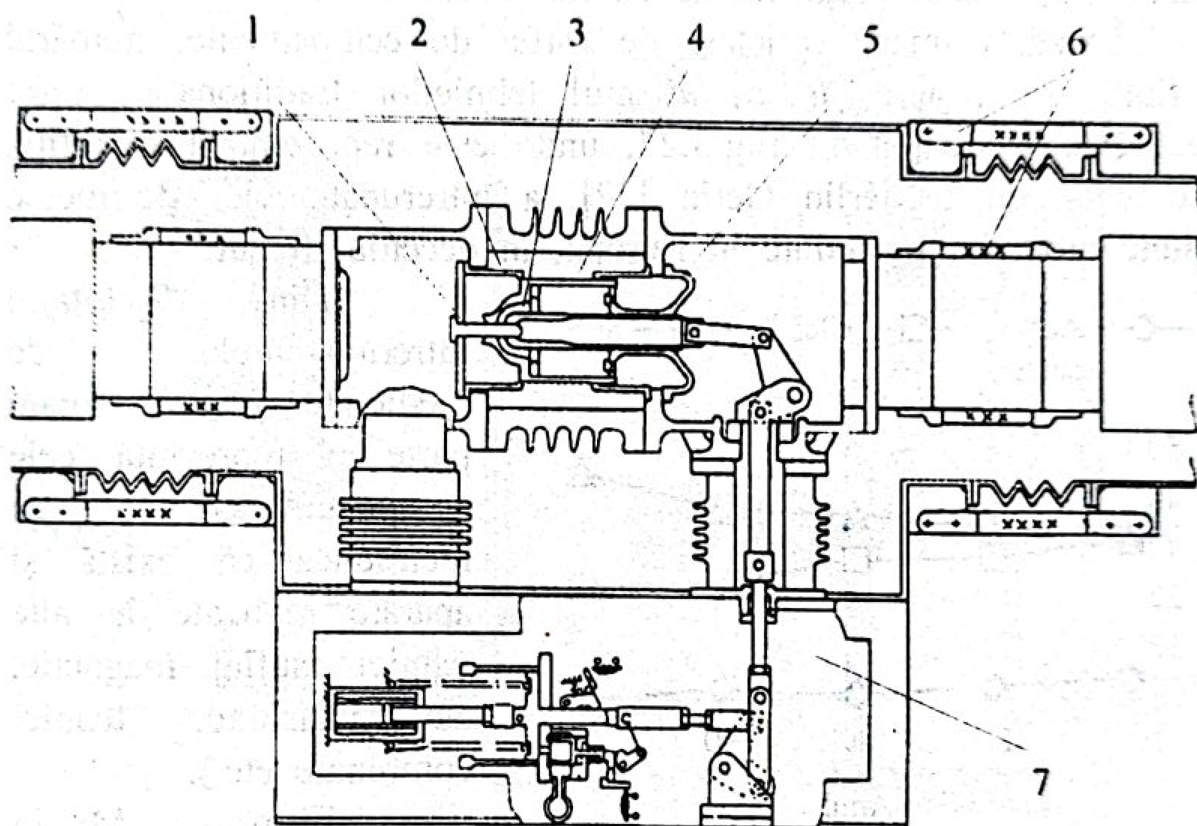


Fig.3.26

Intrerupător de generator (Mitsubishi Japonia): 1-contact fix de rupere; 2-contact fix de lucru; 3-contact mobil; 4-cilindru; 5-piston; 6-conexiuni flexibile; 7-mecanism de acţionare.

In Fig.3.26 se dă un exemplu de întrerupător cu autocompresie pentru generator, fabricat de firma Mitsubishi Japonia [23], [30]; acesta este capabil să întrerupă un curent de defect de 110 kA şi să suporte sarcini de regim normal cu intensităţi de până la 13 kA doar cu răcire prin convecţie naturală şi de până la 25 kA cu convecţie forţată de aer.

3.3.3. Intrerupătoare de medie tensiune

Instalaţiile de distribuţie de medie tensiune reprezintă de asemenea un domeniu larg de aplicare a tehnicilor de comutaţie în hexafluorură de sulf; un loc important între acestea îl ocupă tehnica autopneumatică. Spre deosebire de construcţiile de înaltă tensiune, întrerupătoarele de medie tensiune sunt realizate în variantă tripolară, acţionarea obţinându-se cu mecanism unic.

Există o mare varietate de astfel de echipamente, numărul lor fiind în creştere, în detrimentul tehnicilor tradiţionale. Acest aspect este evidenţiat în Fig.3.27, unde este reprezentată repartiţia procentuală, după Merlin Gerin [32], a întrerupătoarelor de medie tensiune produse şi vândute în Europa, în deceniul trecut.

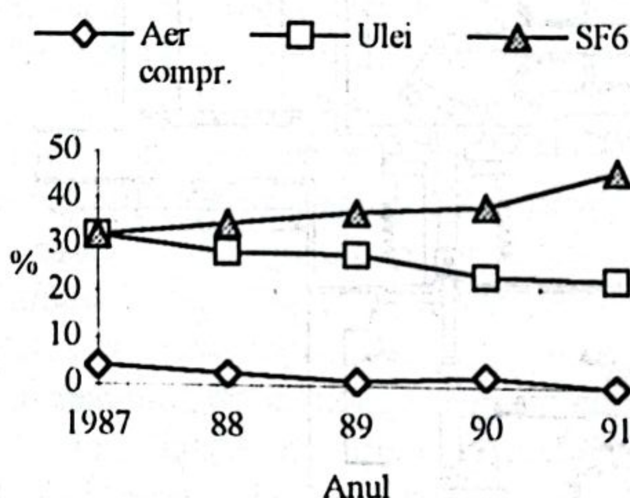


Fig.3.27
Evoluţia întrerupătoarelor de medie tensiune

Din totalul întrerupătoarelor de medie tensiune, o mare parte o reprezintă cele autopneumatice, cu menţiunea că există şi aparate realizate în alte tehnici (suflaj magnetic, autoexpansiune, tehnici combinate etc.).

Firma Merlin Gerin a dezvoltat o întreagă gamă de echipamente de medie tensiune cu comutaţie în hexafluorură de sulf, un loc important ocupându-l aparatele realizate în tehnica autopneumatică. Dintre acestea fac parte şi întrerupătoarele tripolare de interior tip Fluarc FG2, utilizate în principal pentru manevre şi protecţie în reţele de distribuţie publice şi industriale cu tensiuni nominale de la 1 la 17,5 kV; aparatele se construiesc în variantă fixă şi debroşabilă, cu intensitatea curentului nominal în gama 630...3150 A şi capacitatea nominală de deconectare la scurtcircuit de 40...50 kA. Pentru acţionare, întrerupătoarelor le sunt asociate dispozitive cu acumulare de energie în resorturi.

Schița unui aparat tip FG2 debroșabil, cu dimensiunile principale [32], este dată în Fig.3.28.

Construcția camerei de stingere (Fig.3.29) [32], [33], este închisă în anvelopa electroizolantă 1, prevăzută cu capace frontale de etanșare, în care hexafluorura de sulf se găsește la presiuni scăzute, de 0,15...0,25 MPa.

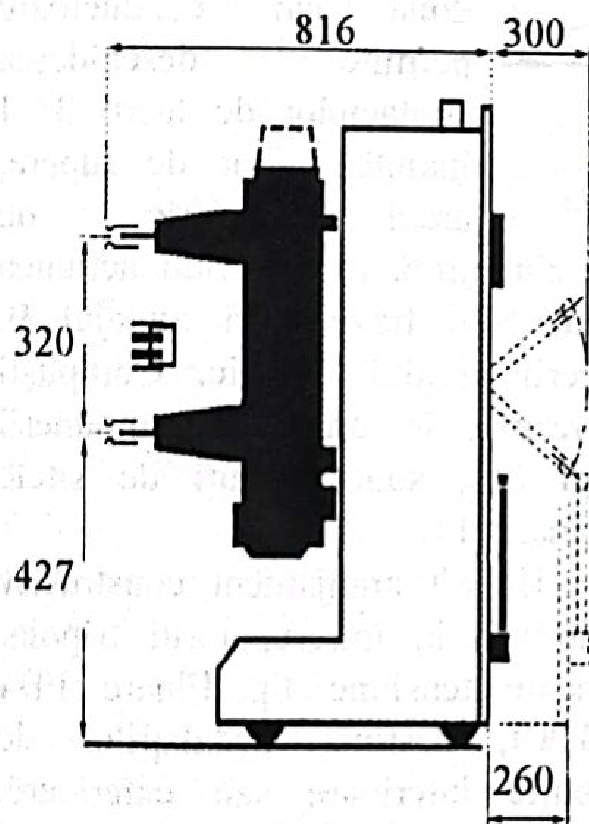


Fig.3.28
Intrerupător debroșabil FG2 Merlin Gerin

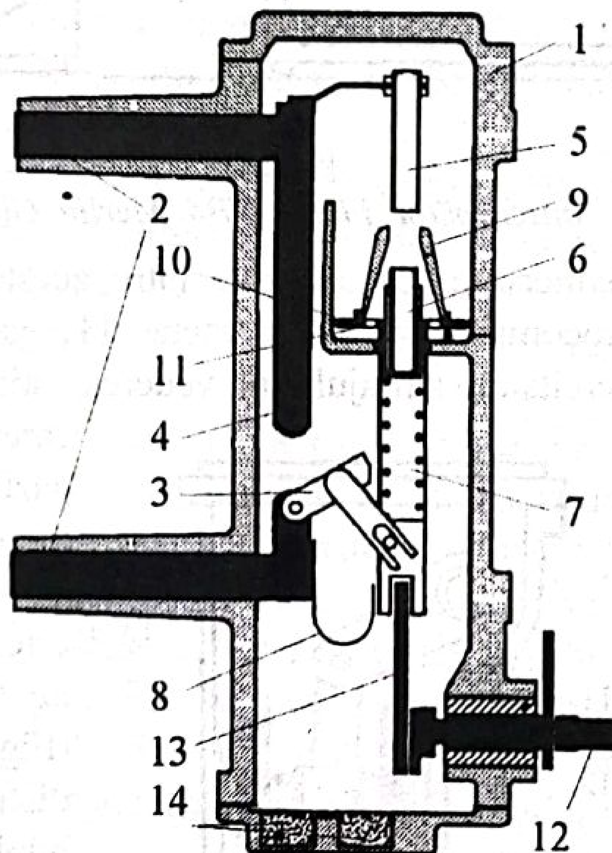


Fig.3.29
Polul întrerupătorului FG2 Merlin Gerin

Calea principală de curent a polului este constituită din bornele de conexiune 2 și contactele de lucru, 3-mobil și 4-fix. In paralel cu calea principală de curent este conectat traseul de rupere, format din contactele de rupere (5-fix, 6-mobil), tija conductoare 7 și conexiunea flexibilă 8.

Sistemul de suflaj autopneumatic este constituit din ajutajul electroizolant 9, pistonul mobil 10 și camera de compresie 11. La acționare, mișcarea se transmite de la axul motor 12 la echipajul

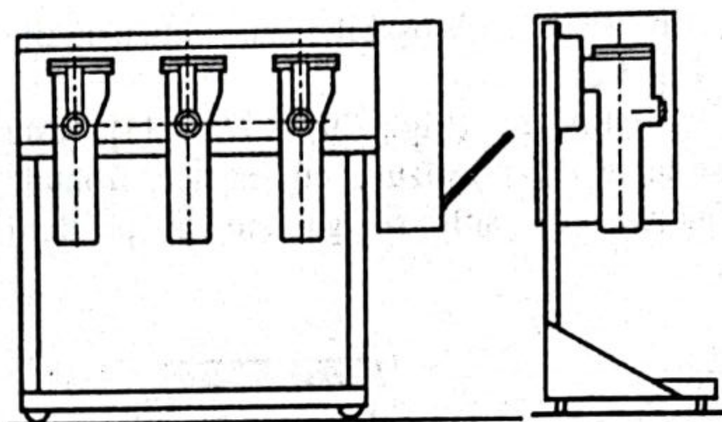


Fig.3.30
Intrerupător Fluarc FB4 Merlin Gerin

mobil (format din reperele 3, 6, 7, 9, 10), prin intermediul pârghiei electroizolante 13. Corelarea mecanică a lanțurilor cinematice corespunzătoare celor două căi conductoare permite deschiderea contactelor de lucru 3, 4 înaintea celor de rupere, arcul electric de deconectare formându-se între acestea din urmă (5, 6). Sub acțiunea autocompresiei din camera 11, gazul SF_6 traversează ajutajul 9, exercitând suflajul în vederea stingerii arcului electric. Compușii care rezultă în urma descompunerii gazului SF_6 sunt reținuți de sitele moleculare 14.

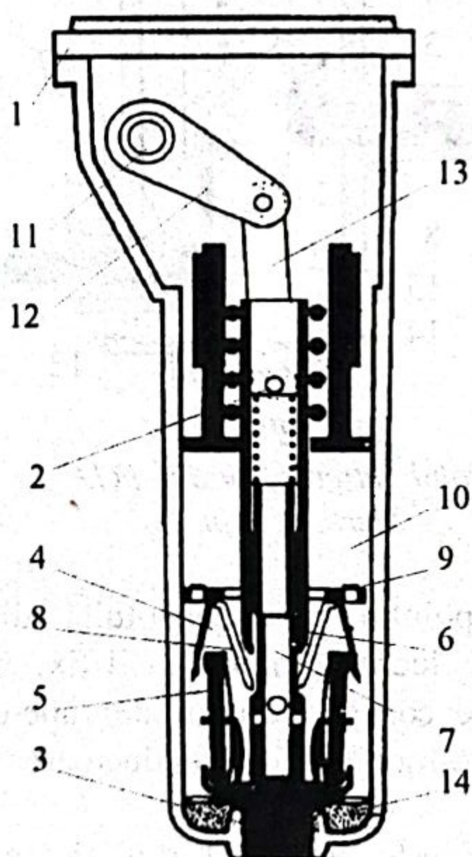


Fig.3.31
Secțiune prin pol (FB4, Merlin Gerin)

Un alt aranjament constructiv este întîlnit la întrerupătorul tripolar de medie tensiune tip Fluarc FB4 (Fig.3.30), destinat instalațiilor de distribuție interioare sau exterioare, publice respectiv industriale, cu tensiuni nominale de până la 40,5 kV. Se construiește pentru intensități ale curentului nominal în domeniul 400...1250 A și cu capacitate de deconectare la scurtcircuit de 25...31,5 kA.

Partea activă a întrerupătorului, reprezentată în Fig.3.31 după [32], funcționează în anvelopa electroizolantă cu etanșare pe viață 1, umplută cu gaz SF_6 la presiunea de 0,15 MPa. Fiecare pol conține traseul principal conductor,

constituit din bornele de conexiune 2, 3 şi contactele de lucru, 4-mobil si 5-fix. In paralel cu contactele de lucru sunt conectate contactele tubulare de rupere (6-mobil şi 7-fix).

Sistemul de autocompresie a gazului este constituit din ajutajul electroizolant 8, pistonul mobil 9 şi camera de compresie 10.

La acţionare, mişcarea se transmite de la axul motor 11, prin manivela 12 şi bieleta 13, la contactele mobile. După deschiderea contactelor de lucru 4, 5, arcul electric se amorsează între contactele de rupere 6, 7.

Gazul SF_6, comprimat în incinta 10, traversează ajutajul 8 şi exercită suflajul necesar stingerii definitive a arcului electric. Fluorurile superioare care rezultă din descompunerea chimică a hexafluorurii de sulf la temperatura arcului electric sunt reţinute de sitele moleculare 14.

Intrerupătoarele de medie tensiune cu autocompresie de tip Fluarc fabricate de Merlin Gerin [32], sunt utilizate şi în construcţia celulelor prefabricate de tip Fluair [33], destinate posturilor de transformare pentru instalaţii de distribuţie cu tensiuni nominale de 1...40 kV. Instalaţii similare sunt produse şi de firma ABB, [36].

In România, SC Electroputere SA fabrică întrerupătoare cu autocompresie de medie tensiune de interior tip HF 12/24 kV, destinate centralelor electrice, staţiilor de transformare şi instalaţiilor de distribuţie, [47].

Aceeaşi firmă produce contactoarele electromagnetice tripolare de medie tensiune cu comutaţie în gaz SF_6 de tip HEXA CONT [46], utilizabile în instalaţiile de comandă a electromotoarelor de înaltă tensiune, transformatoarelor şi bateriilor de condensatoare.

Intrerupătoarele cu hexafluorură de sulf realizate în tehnica autopneumatică au dimensiuni de gabarit mai mici şi nu necesită o întreţinere deosebită.

Reviziile acestor echipamente se fac cu o periodicitate de câţiva ani [1], de fiecare dată examinându-se componentele constructive ale sistemului de contacte, garniturile de etanşare împotriva scurgerilor de gaz SF_6 şi înlocuindu-se filtrele sau sitele moleculare.

3.4. Intrerupătoare cu suflaj magnetic

La întrerupătoarele cu hexafluorură de sulf realizate în tehnică pneumatică sau autopneumatică arcul electric de deconectare este supus unui suflaj cu gaz sub presiune, în măsură să producă răcirea coloanei acestuia prin evacuarea căldurii în afara volumului camerei de stingere. Arcul electric este practic fixat între contacte în timp ce hexafluorura de sulf, ca mediu de stingere, se deplasează pe seama diferenţelor de presiune.

Principiul de stingere pe care se bazează funcţionarea întrerupătoarelor cu suflaj magnetic [7], [16], [20], [23], constă în deplasarea rapidă a arcului electric într-un volum închis de hexafluorură de sulf, aflat iniţial în repaus. In acest caz, mediul de stingere este practic fix iar coloana arcului electric, sub acţiunea unor forţe de tip Lorentz, se deplasează cu viteze comparabile cu cea a sunetului.

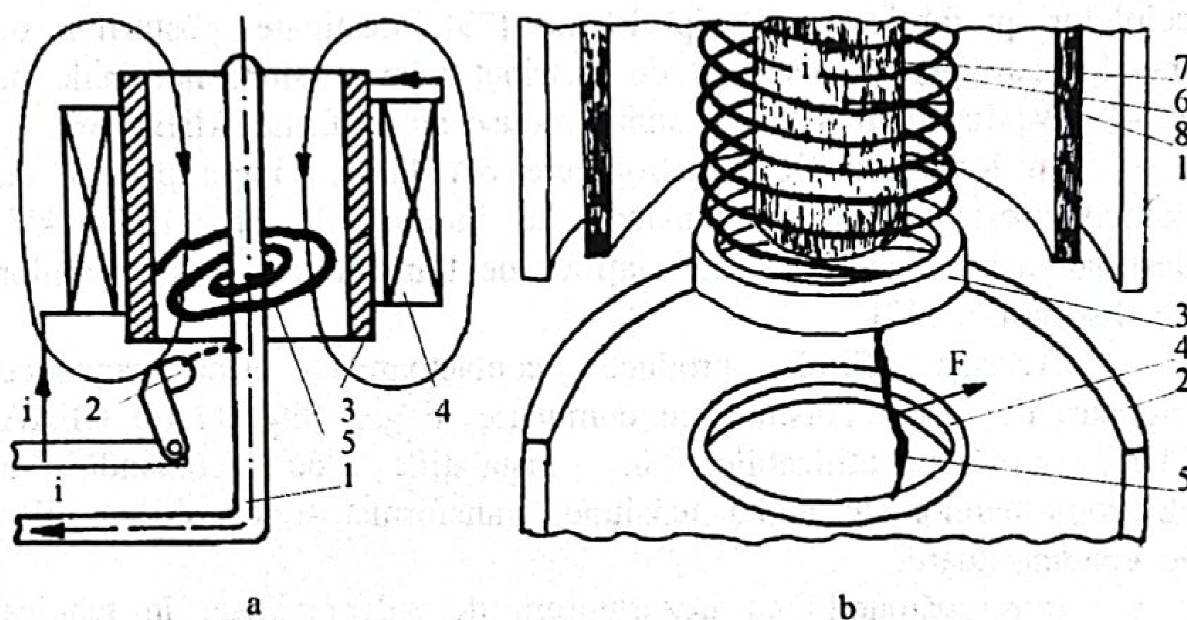


Fig.3.32

Tehnica suflajului magnetic: a-sistem coaxial; b-sistem axial.

Câmpul magnetic necesar punerii în mişcare a coloanei arcului este produs de o bobină parcursă de curent pe durata deconectării sau de magneţi permanenţi amplasaţi în zona contactelor, energia necesară suflajului fiind deci furnizată de o

sursă exterioară. Suflajul magnetic se obține în sistem coaxial, respectiv axial.

In cazul sistemului coaxial, Fig.3.32a, arcul electric amorsat la deconectare inițial între contactele 1-fix și 2-mobil, este imediat preluat între electrozii 1, 3, astfel încât curentul care trebuie întrerupt să traverseze spirele bobinei de suflaj 4.

In câmpul magnetic al acestei bobine, forțele de tip Lorentz imprimă coloanei arcului o mișcare rapidă de rotație, dispunând-o sub forma unei elicoide spațiale, cu extremitățile mobile pe electrozii coaxiali 1, 3. Alungirea coloanei favorizează cedarea căldurii spre mediul de stingere, iar deplasarea rapidă a acesteia intensifică deionizarea prin difuzie.

La sistemul axial de suflaj magnetic (rotary-arc circuit breaker) contactele întrerupătorului (atât cele de lucru, 1-fix, 2-mobil cât și cele de rupere, 3-fix, 4-mobil) sunt inelare și amplasate față în față pe aceeași axă, așa cum se poate vedea în Fig.3.32b.

Arcul electric 5, preluat între contactele de rupere 3, 4, arde în câmpul magnetic produs de bobina de suflaj 6, parcursă de curent. Liniile de câmp se închid prin piesa polară 7 și mantaua feromagnetică 8, trasee care le imprimă o distribuție radială în zona de ardere a arcului electric. In aceste condiții, forțele Lorentz au orientare tangențială, încât coloana 5 a arcului electric este antrenată într-o mișcare rapidă de rotație (arc turnant, rotating arc), deplasându-se cu extremitățile pe contactele circulare 3, 4.

Pe lângă simplitate constructivă, întrerupătorul cu suflaj magnetic se caracterizează printr-o slabă electroeroziune a contactelor deoarece, ca urmare a deplasării extremităților arcului electric, temperatura înaltă nu se mai localizează în zone practic fixe pe suprafețele de contact.

Distanța dintre contacte, dependentă de nivelul nominal de izolație și de presiunea statică a hexafluorurii de sulf, rezultă mai mică decât la întrerupătoarele realizate în tehnică autopneumatică, energia necesară acționării având valori de asemenea mai mici. Aceste particularități permit dimensionarea, realizarea și funcționarea în condiții avantajoase a mecanismului de acționare.

Se exemplifică tehnica suflajului magnetic (sistem axial sau arc turnant) în gaz SF_6 prin echipamente de medie tensiune

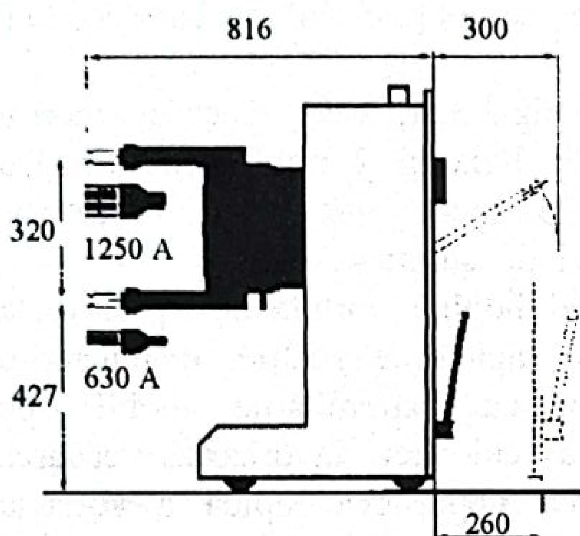


Fig.3.33
Intrerupător Fluarc FG1 Merlin Gerin

construite de firma Merlin Gerin şi anume: întrerupătoarele Fluarc FG1 (1...15 kV/630...1250 A/20...29 kA) şi contactoarele tip Rollarc 400, 400D (3...12 kV/400 A).

Intrerupătorul FG1, construit în variantă debroşabilă, are dimensiunile de gabarit precizate în Fig.3.33; partea activă este reprezentată în Fig.3.34, [32]. Aceasta este etanşată în incinta electroizolantă 1, în care hexafluorura de sulf se găseşte la presiunea de 0,25 MPa.

Calea principală de curent pe pol este constituită din bornele de conexiuni 2, 3 şi din contactele de lucru (4-fix, 5-mobil); în paralel cu contactele de lucru este conectat sistemul contactelor de rupere, 6-fix, 7-mobil.

Transmisia mişcării la contactele mobile se face de la arborele motor 8, prin intermediul sistemului bielă electroizolantă (9) - manivelă (10).

Pentru protecţie la electroeroziune, contactele de lucru se deschid în avans faţă de cele de rupere, încât arcul electric se amorsează între acestea din urma; imediat extremităţile coloanei sale sunt preluate de electrozii inelari 11, 12, conectaţi respectiv la potenţialele contactelor de rupere 6, 7. In acest moment în circuitul curentului care trebuie întrerupt este înseriată bobina de suflaj magnetic 13 care produce, în zona de ardere a arcului, câmpul magnetic specific tehnicii suflajului magnetic.

Fiind obişnuit folosite în reţelele de distribuţie publice şi industriale, întrerupătoarele tip FG1 sunt adaptate cu deosebire la întreruperea curenţilor mici inductivi.

Contactoarele tip Rollarc 400 si 400D, ca echipamente de medie tensiune, sunt destinate utilizării în instalaţiile de comandă şi protecţie a electromotoarelor, condensatoarelor şi transformatoarelor de putere.

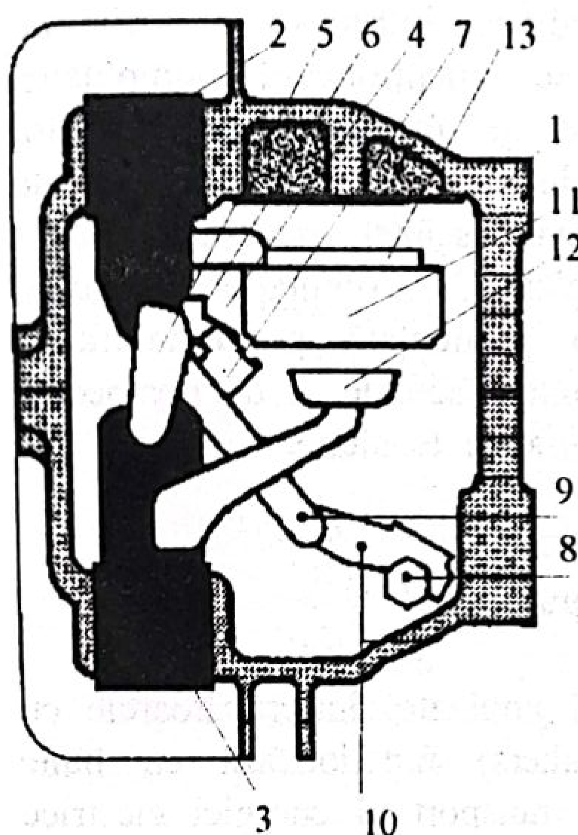


Fig.3.34
Intrerupător cu suflaj magnetic Fluarc FG1 Merlin Gerin

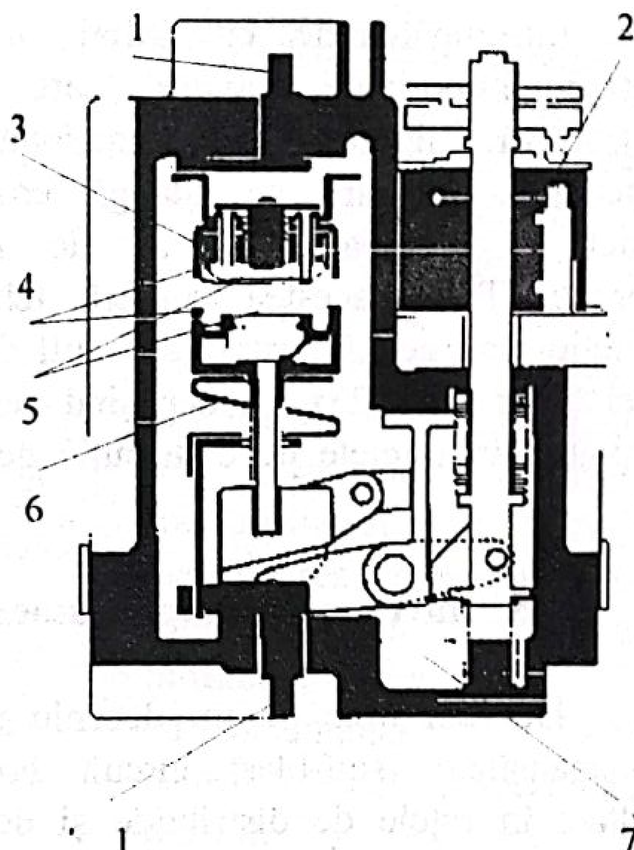


Fig.3.35
Contactor cu suflaj magnetic Rollarc 400 Merlin Gerin

Construcţia conţine polii principali, înglobaţi într-o anvelopă electroizolantă şi cu rol de etanşare, în care gazul SF_6 este utilizat la presiunea de 0,25 MPa. Dispozitivul de acţionare funcţionează cu reţinere magnetică pentru varianta Rollarc 400 şi cu acroşaj mecanic pentru Rollarc 400D.

Arhitectura părţii active a contactorului cu principalele repere constructive este reprezentată, după [32], în Fig.3.35 unde s-a notat: 1-borne de conexiuni, 2-electromagnet de acţionare, 3-bobină de suflaj, 4-contacte de lucru, 5-contacte de rupere, 6-conexiune flexibilă, 7-filtru.

Pentru protecţia la scurtcircuit, contactorului i se pot asocia siguranţe fuzibile.

Contactoarele Rollarc sunt utilizate în realizarea unor categorii de celule prefabricate din gama Fluair Merlin Gerin [33], destinate posturilor de transformare din instalaţiile de distribuţie de medie tensiune.

Intrerupătoarele cu suflaj magnetic întrunesc o serie de avantaje importante, dintre care se menţionează simplitatea constructivă, siguranţa în funcţionare şi utilizarea practic fără mentenanţă, la care se adaugă eroziunea redusă a pieselor de contact şi energia mecanică de nivel scăzut necesară pentru acţionare. Toate acestea conferă tehnicii de comutaţie cu suflaj magnetic în hexafluorură de sulf o pronunţată performabilitate, apreciată uneori, [23], ca depăşind cerinţele actuale şi de perspectvă apropiată din reţelele de distribuţie de medie tensiune.

3.5. Intrerupătoare cu autoexpansiune

De mai bine de un deceniu şi jumătate, întrerupătoarele cu autoexpansiune (self-blast circuit breakers) funcţionează cu bune rezultate în reţele de distribuţie şi de transport al energiei electrice din multe ţări. Pentru diferite aplicaţii, în acest interval de timp, au fost dezvoltate în principal trei tipuri; două dintre acestea şi anume întrerupătoarele cu suflaj prin autoexpansiune cu arc rotativ, respectiv cu rezonator Helmholtz sunt construite pentru instalaţii de medie tensiune, ca întrerupătoare de generator sau pentru reţele de distribuţie.

In cazul celui de al treilea tip, care se referă la construcţii pentru tensiuni de peste 72,5 kV (întrerupătoare de înaltă tensiune), suflajului prin autoexpansiune i se asociază o componentă obţinută prin autocompresie, care intervine numai la întreruperea curenţilor de mică intensitate. Pentru întreruperea curenţilor de scurtcircuit şi, în general a curenţilor de mare intensitate, funcţionează numai suflajul prin autoexpansiune, energia arcului producând creşterea presiunii hexafluorurii de sulf într-un volum închis.

Statisticile privind defectările întrerupătoarelor de înaltă tensiune arată că nu parametrii electrici ai acestora sunt decisivi în asigurarea fiabilităţii, ci comportarea sistemului mecanic în general şi a mecanismului de acţionare în special.

Mecanismul de acţionare al întrerupătoarelor cu autoexpansiune, eliberat de sarcina producerii presiunii necesare

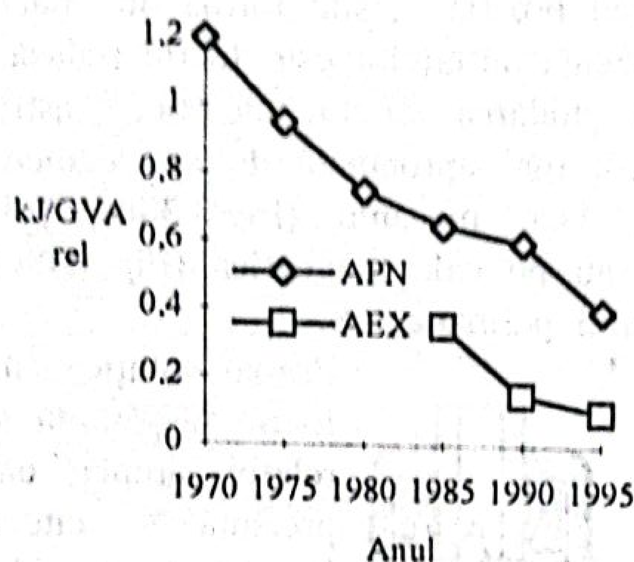


Fig.3.36
Evoluţia energiei mecanismului de acţionare

suflajului, este mult mai puţin solicitat, fapt care conduce la creşterea indicatorilor generali de fiabilitate. Ilustrative în acest sens sunt datele din Fig.3.36 care indică evoluţia, exprimată în unităţi relative, a energiei necesare mecanismului de acţionare pentru realizarea puterii de rupere unitare în cazul întrerupătoarelor autopneumatice (APN) respectiv cu autoexpansiune (AEX).

Dezvoltarea tehnicilor de comutaţie în hexafluorură de sulf cu suflaj prin autoexpansiune a căpătat în ultimul deceniu caracter competiţional, în special cu privire la atingerea performaţelor de natură electrică. In Fig.3.37 este prezentată pentru comparaţie [13], dinamica puterii de rupere caracterizând întrerupătoarelor cu autocompresie, APN respectiv cu autoexpansiune, AEX.

In camerele de stingere ale acestor întrerupătoare suflajul cu hexafluorură de sulf se obţine prin dilatarea gazului sub acţiunea căldurii cedate la temperatura înaltă de coloana arcului electric însăşi [20], [21]. Acest principiu conduce la simplificarea construcţiei dispozitivelor de stingere din care se elimină acţiunea pistonului, util pentru comprimarea gazului în tehnica autopneumatică.

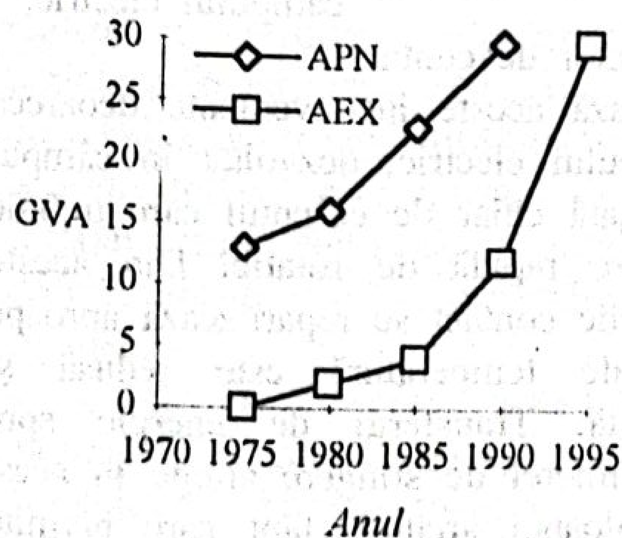


Fig.3.37
Puterea de rupere

In camera de stingere (Fig.3.38a) coloana arcului

este instabilă, aceasta ocupând rapid poziţia 6, sub formă de buclă la exteriorul contactului, unde eficienţa suflajului este foarte redusă.

Problema se rezolvă prin ghidarea arcului electric, astfel încât acesta să ocupe o poziţie cât mai aproapiată de axa camerei de stingere. Ghidarea se poate face mecanic (Fig.3.38b), prin utilizarea duzei electroizolante 7 sau pe cale magnetică (Fig.3.38c), cu ajutorul bobinei sau a magnetului permanent 8.

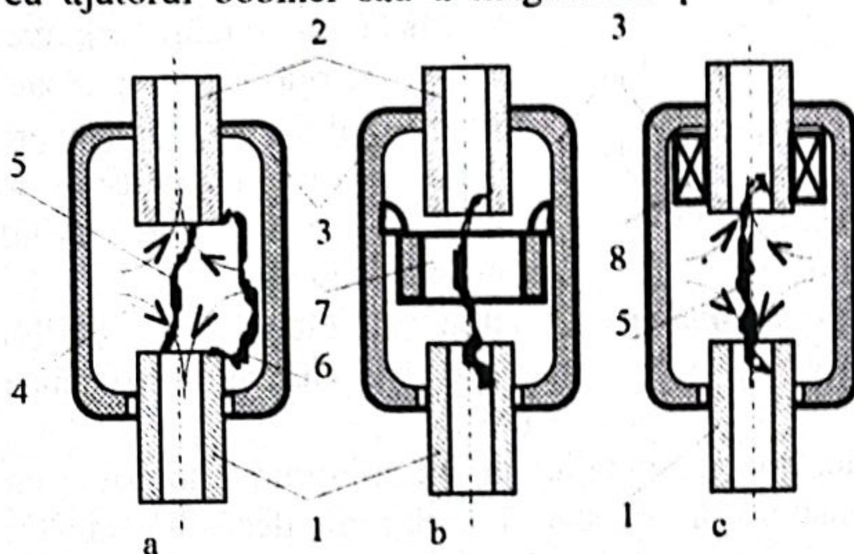


Fig.3.38

Principiul autoexpansiunii: 1-contact mobil, 2-contact fix, 3-incintă etanşă, 4-jet de gaz SF_6, 5,6-arc electric, 7-duză izolantă, 8-bobină sau magnet

Prima soluţie este foarte răspândită şi relativ simplă, dar prezintă câteva inconveniente [3], dintre care se menţionează:

-căldura cedată de coloana arcului spre gazul SF_6 este redusă doar la 15% din energia totală;

-prezenţa duzei electroizolante produce perturbarea câmpului electric;

-electroeroziunea intensă a suprafeţelor de contact.

Ghidarea magnetică atenuează aceste inconveniente deoarece în acest caz duza lipseşte, iar arcului electric, dezvoltat în câmpul magnetic produs de bobina traversată chiar de curentul care trebuie întrerupt, i se imprimă o mişcare rapidă de rotaţie. Din aceste motive energia cedată suprafeţelor de contact se repartizează aproape uniform pe acestea, creşterea de temperatură este redusă şi intensitatea electroeroziunii scăzută. Transferul de energie spre hexafluorura de sulf din incinta camerei de stingere atinge în acest caz pînă la 25% din energia coloanei arcului, fapt care permite creşterea capabilităţii de întrerupere. Construcţia camerei de stingere care echipează un întrerupător cu hexafluorură de sulf funcţionând

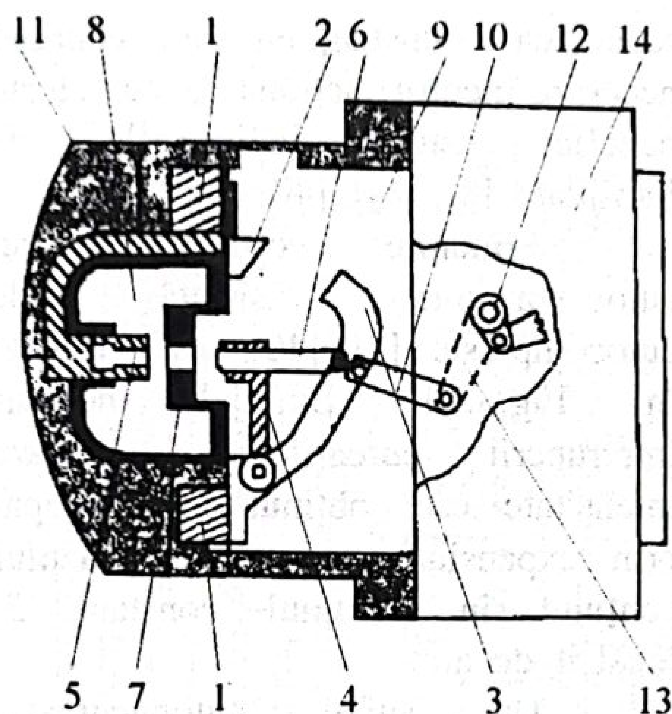


Fig.3.39
Intrerupător cu autoexpansiune

cu autoexpansiune şi ghidare a arcului electric prin duză electroizolantă este prezentată în Fig.3.39, [21]. Calea de curent este constituită din bornele de conexiuni 1, contactele de lucru (2-fix, 3-mobil) şi contactele de rupere (5-fix, 6-mobil). La deschiderea întrerupătorului, mişcarea se transmite de la axul 12 al mecanismului de acţionare 14, prin sistemul de pârghii 10, 13, la echipajul mobil. Contactele de rupere 5, 6 se deschid după contactele de lucru 2, 3, astfel încât arcul electric se amorsează în camera de stingere 8, între contactele de rupere. Atâta timp cât contactul 6 obturează duza 7, sub acţiunea temperaturii înalte a arcului electric presiunea gazului din incinta 8 creşte. Din momentul eliberării acestei duze, coloana arcului este supusă unui suflaj longitudinal unilateral, detenta gazului SF_6 producându-se în incinta 9.

Destinat instalaţiilor de medie tensiune, întrerupătorul este realizat în construcţie tripolară, cele trei camere de stingere fiind înglobate în anvelopa unică 11, din răşină epoxidică. Spre deosebire de tehnica autopneumatică, întrerupătoarele cu autoexpansiune pot fi considerate ca echipamente cu comutaţie lină, energia necesară suflajului fiind furnizată de arcul electric însăşi; din acest punct de vedere, funcţionarea se aseamănă cu cea întâlnită la întrerupătoarele cu ulei.

De la începutul actualului deceniu, o nouă generaţie de întrerupătoare cu hexafluorură de sulf a fost realizată, prin asocierea avantajelor întrerupătoarelor cu autoexpansiune, celor care caracterizează tehnica autopneumatică; această tehnologie hibridă, funcţionând cu autoexpansiune asistată de autocompresie, a permis

reducerea substanţială a energiei necesare pentru acţionare, cu efecte benefice asupra indicatorilor de fiabilitate [8], [24], [40].

Principiul comutaţiei prin autoexpansiune asistată de autocompresie [8], [40], este ilustrat în Fig.3.40. Suflajul necesar întreruperii curenţilor de mare intensitate este obţinut în principal prin expansiunea termică a gazului conţinut în volumul constant 5, încălzit de arc.

Un suflaj autopneumatic suplimentar, utilizând gazul comprimat la deconectare în volumul 7 (descrescător pe măsura deplasării contactului mobil), se exercită la întreruperea curenţilor de mică intensitate, când autoexpansiunea este slabă. Valva 6 a cilindrului mobil se deschide la începutul deplasării echipajului mobil şi rămâne deschisă atâta timp cât presiunea în volumul constant 5 este excedată de presiunea din volumul 7. Valva 8 a pistonului fix se deschide dacă presiunea în volumul 7 depăşeşte o valoare reglată.

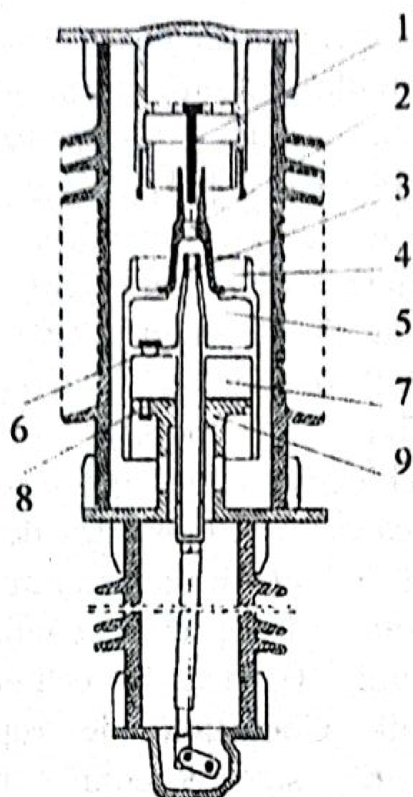


Fig.3.40

Autoexpansiune asistată de autocompresie: 1-contact fix; 2-ajutaj principal; 3-contact mobil; 4-cilindru; 5-volum constant; 6-valva cilindrului; 7-volum comprimabil; 8-valva pistonului; 9-piston.

Comparativ cu tehnica autopneumatică, întrerupătoarele de acest tip necesită un piston de dimensiuni reduse, fapt care permite micşorarea energiei necesare pentru acţionare [8], [24].

Un alt exemplu de concretizare a acestei idei este prezentat în Fig.3.41, [30]. In faza incipientă a deconectării (Fig.3.41a), gazul SF_6 încălzit de arcul electric 3 este parţial retrimis în volumul dintre cilindrul mobil 4 şi pistonul fix 5, contribuind la creşterea presiunii în acest spaţiu. In faza finală (Fig.3.41b), presiunea crescută a gazului care exercită suflajul compensează o oarecare scădere a capacităţii sale de răcire (datorată temperaturii

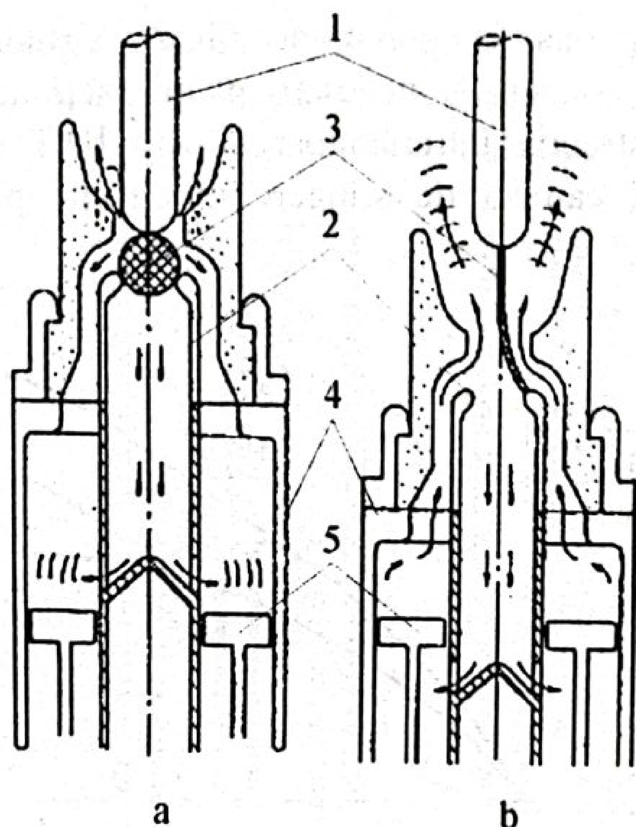


Fig.3.41

Principiul tehnicii hibride de comutație în SF_6: a-faza incipientă a deconectării; b-faza finală; 1-contact fix; 2-contact mobil; 3-arc electric; 4-cilindru mobil; 5-piston fix.

mai ridicate), obținându-se o creștere a capacității de deconectare la scurtcircuit cu circa 20%.

In alte construcții de acest tip se utilizează un piston recuperator prin intermediul căruia se obține creșterea energiei disponibile pentru acționare.

In Fig.3.42 sunt reprezentate curbele suprapresiunii dezvoltate în camera de stingere pe durata deconectării, în cazul unui întrerupător autopneumatic (curba1), respectiv hibrid (curba2).

Se evidențiază că, în ipoteza funcționării la gol (curbele 2), energia necesară pentru comprimarea gazului are valori mai mari la întrerupătoarele autopneumatice. Intrerupătoarele cu autoexpansiune asistată de autocompresie, necesitând un piston de diametru redus, consumă mai puțin de o treime din energia necesară în cazul acționării unui întrerupător autopneumatic, [24].

Extinderea tehnicii hibride de comutație la tensiuni superioare presupune rezolvarea problemei creșterii importante a energiei cinetice a echipajului mobil, care poate fi acoperită însă parțial de energia înmagazinată sub formă de căldură în coloana arcului.

Există soluții tehnice care permit utilizarea optimizată a acestei energii, pe de o parte pentru obținerea suflajului prin autoexpansiune, iar pe de altă parte pentru accelerarea echipajului mobil al întrerupătorului.

Un astfel de dispozitiv, pus la punct de GEC Alsthom, permite reducerea cu circa 30% a energiei necesare pentru acţionare (Fig.3.43); acesta a permis construcţia întrerupătoarelor tip FXT 14 (245 kV-31,5 kA) cu o singură cameră de stingere modul pe pol, [24].

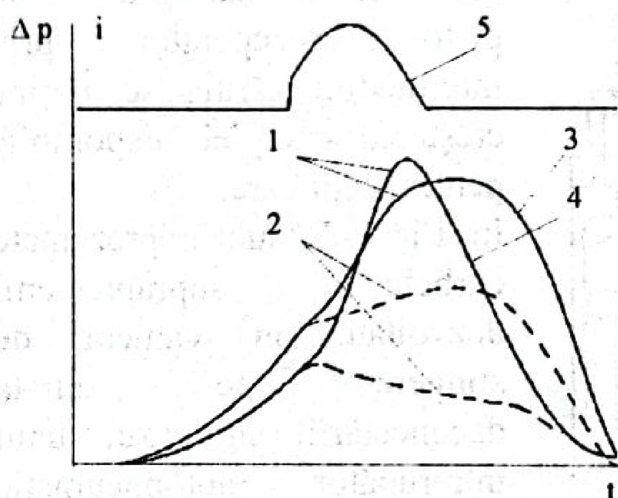


Fig.3. 42

Suprapresiunea la deconectare: 1-acţionare în sarcină; 2-acţionare la gol; 3-autocompresie; 4-autoexpansiune asistată de autocompresie; 5-curba curentului.

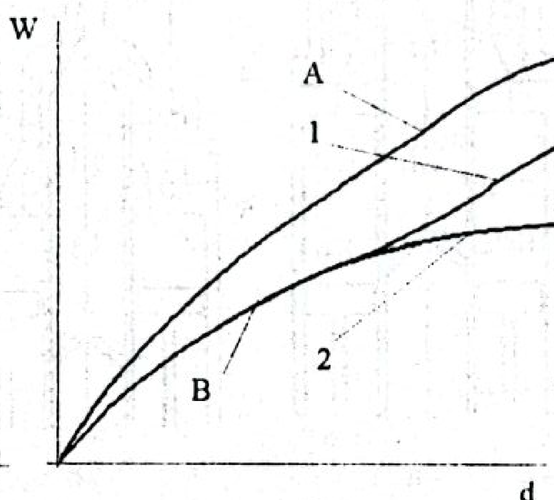


Fig.3.43

Energia necesară pentru deconectare (GEC Alsthom): A-tehnică autopneumatică; B-autoexpansiune cu recuperare de energie; 1-acţionare în sarcină; 2-acţionare la gol.

Asocierea efectului termic al arcului electric pentru obţinerea expansiunii hexafluorurii de sulf cu autocompresia acesteia este utilizată şi în realizarea întrerupătoarelor destinate celulelor blindate, în special când este vorba de construcţii cu parametri electrici ridicaţi, de exemplu 300 kV/50 kA şi un singur loc de întrerupere pe pol (cameră de stingere modul unică).

Si în acest caz utilizarea tehnicii hibride, autoexpansiune-autocompresie, este avantajoasă cu deosebire în ceea ce priveşte minimizarea energiei disponibile a mecanismului de acţionare.

In Fig.3.44 se prezintă un exemplu de acest tip [13], conceput în vederea obţinerii unei viteze sporite de alungire a coloanei arcului electric la deconectare.

Soluţia tehnică utilizată constă într-un sistem special de contacte, Fig.3.44a, având ambele elemente (1, 2) mobile. La

deconectare, prin intermediul angrenajului 3, acestea se deplasează cu aceeași viteză în sensuri opuse, încât viteza de alungire a arcului electric practic se dublează.

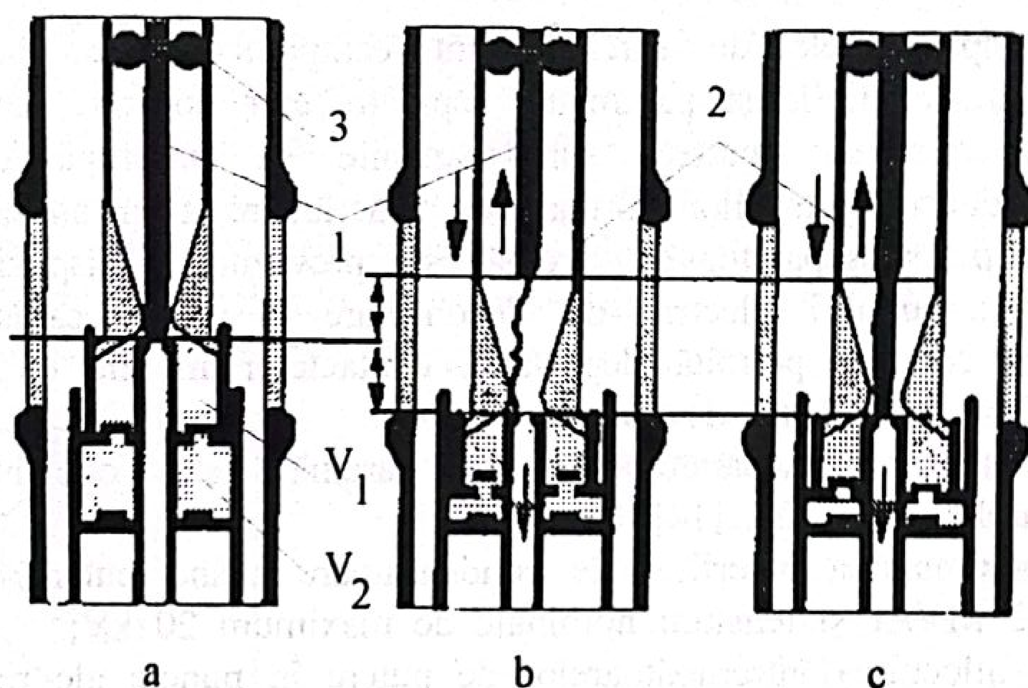


Fig.3.44
Creșterea vitezei relative de deplasare a contactelor: a-întrerupător închis; b-întreruperea curenților de mică intensitate; c-întreruperea curenților de scurtcircuit.

La întreruperea curenților de mică intensitate (Fig.3.44b) creșterea presiunii în camera de stingere pe seama energiei arcului este redusă.

Stingerea arcului are loc în principal sub acțiunea suflajului produs prin autocompresia gazului din volumul V_2. In cazul deconectării unui curent de scurtcircuit, Fig.3.44c, energia înaltă a arcului electric produce un puternic efect de expansiune a gazului din volumul V_1, care se repartizează între exercitarea suflajului și suplimentarea energiei necesare pentru acționare.

Intrerupătoarele cu autoexpansiune s-au impus în comutația de putere prin avantaje specifice, [3]: energie de acționare redusă, absența supratensiunilor de comutație, insensibilitate la viteza de creștere a tensiunii de străpungere în camera de stingere, funcționare corespunzătoare la întreruperea curenților capacitivi, electroeroziune slabă a contactelor.

3.6. Separatoare de sarcină. Scurtcircuitoare

3.6.1. Separatoare de sarcină

Separatoarele de sarcină sunt echipamente de comutaţie având caracteristicile şi parametrii separatoarelor normale dar care, în plus faţă de acestea, sunt capabile să întrerupă curenţii corespunzători regimurilor normale de funcţionare a instalaţiilor. In acest scop, un separator de sarcină este prevăzut cu dispozitiv de stingere a arcului electric de deconectare şi cu mecanism de acţionare care să permită deplasarea contactelor mobile cu viteză adecvată, independentă de operator.

Utilizarea separatoarelor de sarcină este eficientă în următoarele cazuri, [2], [14]:

-comutarea bateriilor de condensatoare având puteri de cel mult 1,2 MVAr şi tensiuni nominale de maximum 20 kV;

-înlocuirea întrerupătoarelor de putere în puncte ale reţelelor caracterizate prin puteri de scurtcircuit de valori mici (30 MVA), dar în care frecvenţa operaţiilor de comutaţie este mare;

-echipament de comutaţie în reţelele buclate, cu rol de a închide şi deschide bucla la sarcină nominală de trecere;

-echipament de comutaţie pentru linii electrice aeriene sau în cablu, funcţionând la gol.

Comparativ cu întrerupătorul de putere, separatorul de sarcină are construcţia mai simplă şi mai ieftină. Inlocuirea întrerupătoarelor de putere cu separatoare de sarcină în punctele instalaţiilor de distribuţie cu frecvenţă mare de comutaţie în regim normal de sarcină este eficientă sub raport tehnico-economic deoarece aceeaşi funcţionalitate se obţine cu investiţii şi cheltuieli de exploatare mai mici.

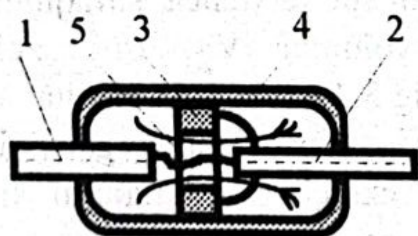


Fig.3.45
Principiul autocompresiei: 1-contact fix, 2- contact mobil, 3-piston, 4-cameră de stingere, 5-arc electric.

Datorită simplităţii constructive, puterea de rupere a separatoarelor de sarcină este limitată la valori de ordinul 25...30 MVA, mai mici decât puterile de scurtcircuit care caracterizează reţelele

de distribuţie. Din aceste motive, protecţia la scurtcircuit în astfel de instalaţii se obţine cu ajutorul fie al întrerupătoarelor de putere, fie al siguranţelor fuzibile. O cale pe care se dezvoltă în prezent tehnica separatoarelor de sarcină o constituie simplificarea construcţiei întrerupătoarelor de putere de înaltă tensiune, astfel încât să fie posibilă realizarea unui echipament mai simplu, mai fiabil şi mai ieftin, care să satisfacă normele impuse separatoarelor de sarcină. In acest mod sunt sunt realizate ca produse de serie şi funcţionează în instalaţii separatoare de sarcină acoperind o gamă foarte largă a tensiunilor nominale, de la medie până la foarte înaltă tensiune (765 kV). Hexafluorura de sulf, utilizată ca mediu electroizolant şi de stingere în construcţia întrerupătoarelor de putere, stă şi la baza construcţiilor moderne de separatoare de sarcină.

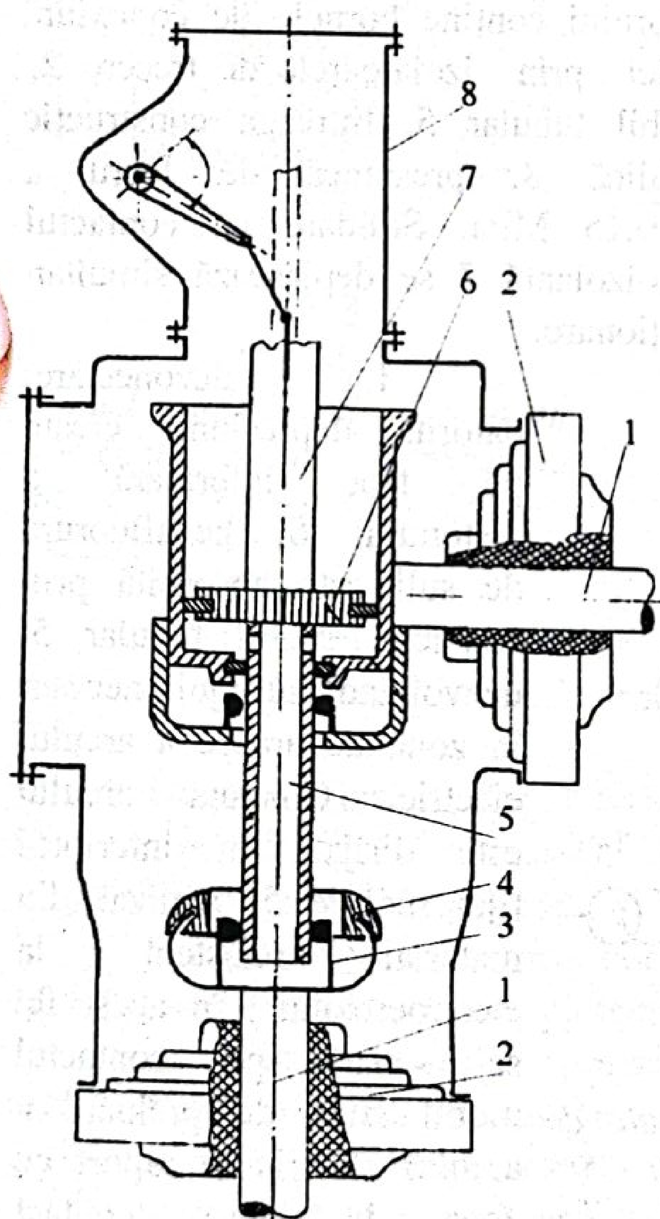


Fig.3.46
Separator de sarcină cu SF_6

Ţinând seama de faptul că aceste echipamente sunt destinate de multe ori funcţionării în structura celulelor blindate, construcţia lor se caracterizează prin existenţa unei carcase etanşe, care conţine toate componentele aferente şi în care gazul SF_6 se găseşte la presiuni variind între 0,15...0,5 MPa, în funcţie de varianta constructivă.

Suflajul cu hexafluorură de sulf, sub acţiunea căruia are loc stingerea arcului electric de deconectare, se obţine prin autocompresie, principiul utilizat fiind reprezentat schematic în Fig.3.45.

Contactele de comutaţie ale separatorului de sarcină, 1-fix şi 2-mobil, se găsesc în incinta etanşă 4, conţinând gazul SF_6 la presiunea de lucru. Solidar cu contactul mobil 2, pistonul 3 comprimă, la deconectare, hexafluorura de sulf. In acest mod, prin ajutajul central al pistonului 3 se exercită suflajul cu gaz, necesar stingerii arcului electric.

In Fig.3.46 este dată construcţia unui separator de sarcină cu hexafluorură de sulf [22], având tensiunea nominală de 110 kV; acesta este capabil să întrerupă curenţi nominali de sarcină de până la 630 A ($\cos\varphi$ = 0,7), curenţi mici inductivi ($\cos\varphi$ = 0,1) de 25 A şi curenţi capacitivi cu intensităţi de cel mult 100 A.

Calea de curent a separatorului conţine bornele de conexiuni 1, izolate de restul construcţiei prin izolatoarele de trecere 2, contactul fix 3 şi contactul mobil tubular 5. Intreaga construcţie este etanşată în carcasa metalică 8, presiunea de lucru a hexafluorurii de sulf fiind de 0,15 MPa. Solidare cu contactul mobil 5, pistonul 6 şi tija electroizolantă 7 se deplasează simultan sub comanda mecanismului de acţionare.

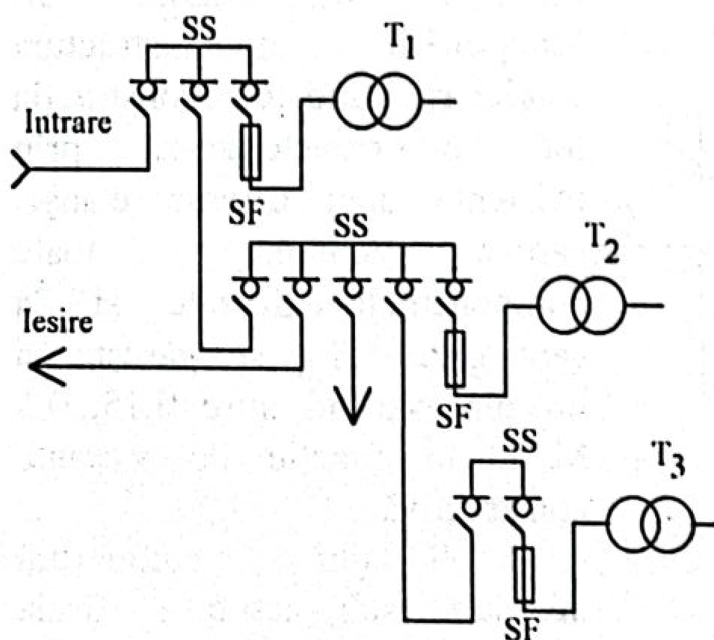


Fig.3.47

Instalaţie de distribuţie cu separatoare de sarcină: SS-separator de sarcină; SF-siguranţă fuzibilă; T_1, T_2, T_3- transformatoare.

La deconectare, datorită depresiunii create pe faţa inferioară a pistonului 6, hexafluorura de sulf este absorbită prin contactul mobil tubular 5, dezvoltând suflajul necesar în zona de ardere a arcului electric. Coloana arcului este dirijată în interiorul tijei mobile 5, realizat din material rezistent la electroeroziune; în acest fel se separă pe contactul mobil zona de preluare a arcului electric în raport cu zona de lucru (contact închis), ultima localizată pe suprafaţa exterioară a tijei

5. Protecţia la electroeroziune a contactului fix 3 se obţine cu ajutorul armăturii inelare 4, realizată de asemenea din material dur, rezistent la acţiunea arcului electric.

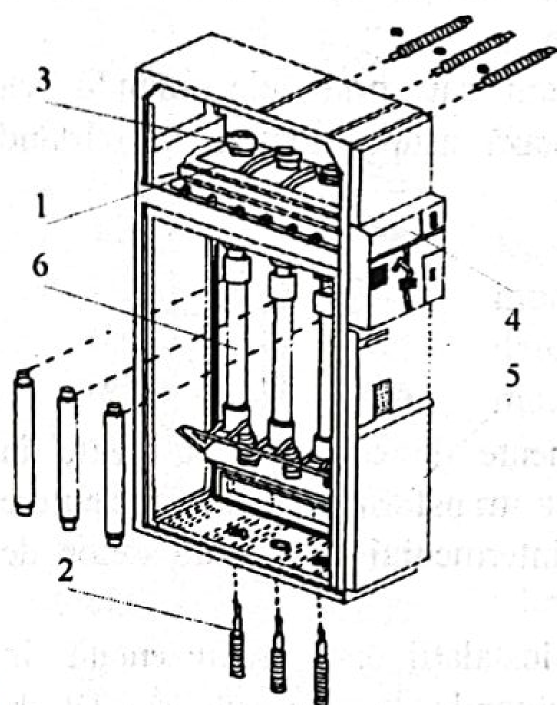


Fig.3.48

Celulă prefabricată: 1-aparataj; 2-racord; 3-bare; 4-mecanism de acţionare; 5-siguranţe fuzibile.

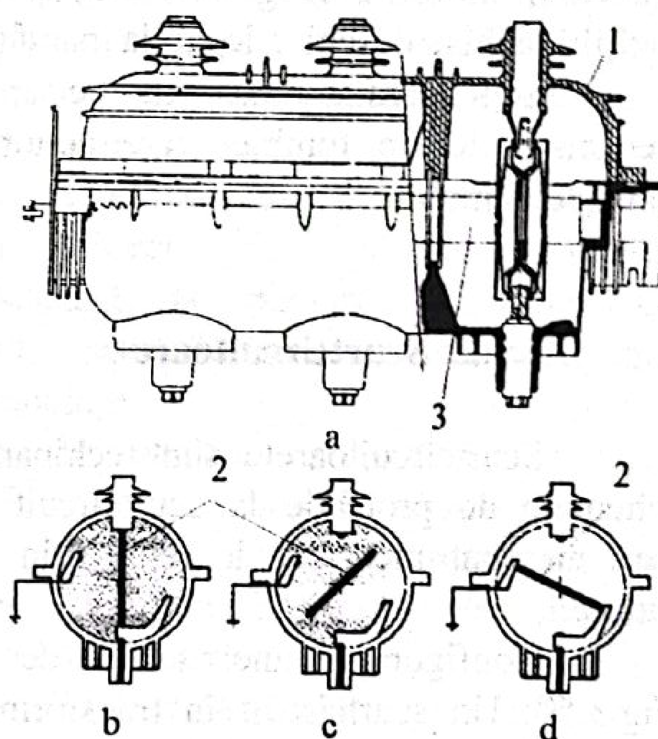


Fig.3.49

Separator de sarcină SM6 Merlin Gerin

Un exemplu de utilizare a separatoarelor de sarcină îl constituie celulele de distribuţie tip SM6 de fabricaţie Merlin Gerin, [35].

Destinate instalaţiilor interioare, acestea pot realiza diferite scheme de distribuţie (Fig.3.47) în instalaţii de medie tensiune, coespunzător gamei 12...24 kV.

Separatoarele de sarcină pot fi conectate singure sau asociate cu siguranţe fuzibile, pentru protecţie la scurtcircuit.

In Fig.3.48 este prezentată construcţia unei celule prefabricate cu cinci compartimente, care poate fi folosită în realizarea arhitecturii dorite pentru o instalaţie de distribuţie.

Separatorul de sarcină ocupă spaţiul 1 al aparatajului şi are construcţia prezentată în Fig.3.49a, [35].

Realizat ca aparat tripolar, separatorul de sarcină funcționează cu comutație în hexafluorură de sulf care umple, la presiunea relativă de 0,04 MPa, cuva 1, cu etanșare pe viață. Contactul mobil 2 (Fig.3.49b,c,d) poate ocupa una din următoarele poziții: închis, deschis, legat la pământ.

Acționarea se face de pe aparat sau prin telecomandă, cu mecanism de tip tumbler care acționează asupra axului 3, purtând contactele mobile.

3.6.2. Scurtcircuitoare

Scurtcircuitoarele sunt echipamente de comutație utilizate în schemele de protecție la scurtcircuit a transformatoarelor de putere care nu sunt racordate la rețea prin intermediul întrerupătoarelor de putere.

Configurația unei astfel de instalații este reprezentată în Fig.3.50. Un scurtcircuit în transformatoarele T_1, T_2 este sesizat de protecția prin relee a acestora, care comandă închiderea automată a scurtcircuitorului SSC.

Se realizează astfel un scurtcircuit voit (monofazat sau bifazat cu punere la pământ), caracterizat printr-un curent având intensitatea mai mare decât cea corespunzătoare defectului din transformator.

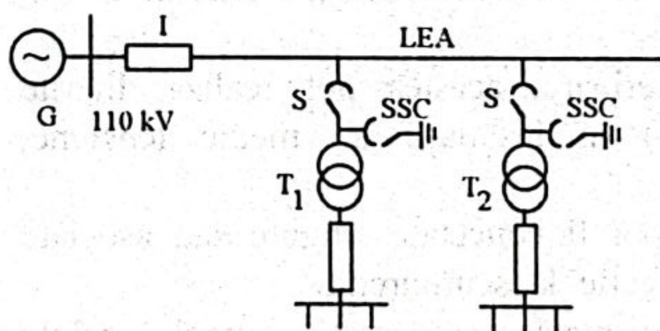


Fig.3.50
Utilizarea scurtcircuitoarelor

In aceste condiții, scurtcircuitul este sesizat de protecția prin relee a întrerupătorului I, care comandă executarea unui ciclu deschis-închis.

In acest mod, întrerupătorul I întrerupe defectul produs în rețea prin închiderea scurtcircuitorului SSC, iar după o pauză de durată prestabilită t_p, repune automat instalația sub tensiune. Pe durata t_p, de asemenea în mod automat, se deschid separatorul de

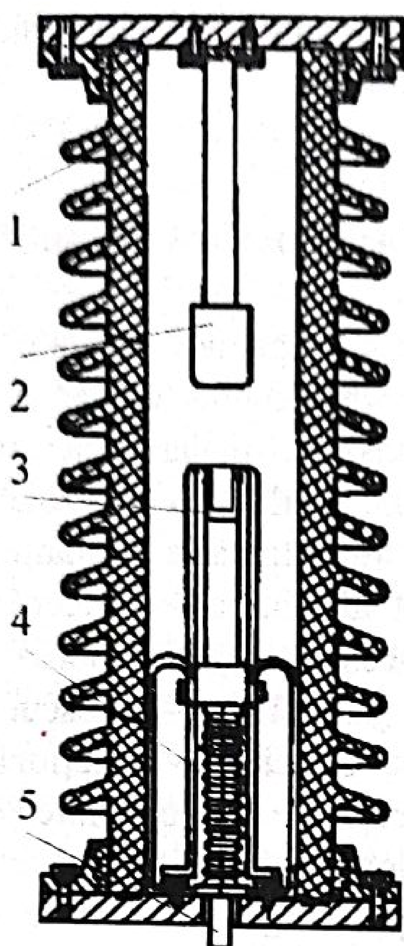


Fig.3.51
Scurtcircuitor cu SF_6

secţionare S şi scurtcircuitorul SSC.

Această succesiune de operaţii de comutaţie conduce în final la lichidarea defectului produs iniţial în transformator, asigurându-se în acelaşi timp continuitatea în alimentarea cu energie a consumatorilor.

Deoarece în reţelele cu neutrul legat direct la pământ punerea monofazată la pământ constituie un defect, scurtcircuitoarele utilizate sunt monopolare.

In reţelele cu neutrul izolat se prevăd scurtcircuitoare bipolare.

Scurtcircuitoarele realizate în tehnica tradiţională sunt de tip deschis, cu izolaţie în aer atmosferic.

Reducerea duratei de acţionare a unui scurtcircuitor este posibilă prin micşorarea distanţei de izolaţie dintre contactele deschise, soluţie care cere un mediu cu proprietăţi electroizolante mai bune decât ale aerului.

Astfel de considerente au condus la construcţia scurtcircuitoarelor funcţionând în hexafluorură. de sulf; o variantă constructivă de acest tip este dată în Fig.3.51, [9].

Contactele surtcircuitorului, 2-fix şi 3-mobil sunt amplasate în izolatorul etanş de porţelan 1, în care se găseşte hexafluorură de sulf la presiune mai mare decât cea atmosferică.

Acţionarea contactului mobil se face prin intermediul tijei 5, cuplată mecanic la lanţul cinematic de transmisie a mişcării de la mecanismul de acţionare (nefigurat).

Etanşarea construcţiei, în condiţiile asigurării mobilităţii contactului 3, se obţine cu ajutorul burdufului din oţel 4.

Pentru tensiunea nominală de 110 kV, distanţa dintre contactele deschise ale scurtcircuitorului este de 85...110 mm, timpul propriu realizat fiind de 4...5 ori mai mic decât în cazul scurtcircuitoarelor cu contacte în aer.

Construcţia prezintă de asemenea avantajele funcţionării protejate în raport cu acţiunea factorilor de mediu.

3.7. Instalaţii capsulate, izolate în hexafluorură de sulf

Ideea de bază a realizării instalaţiilor capsulate izolate în gaz SF_6 constă în închiderea întregului echipament conectat la barele unei staţii într-o incintă metalică etanşă şi izolarea acestuia în hexafluorură de sulf. Prin proprietăţile sale electroizolante excepţionale, acest gaz permite o reducere importantă a distanţelor de izolaţie şi deci a dimensiunilor de gabarit ale staţiei. Incepând cu anii 1960, data primelor realizări de acest gen în Japonia şi Europa, concepţia instalaţiilor capsulate în gaz SF_6 a cunoscut o evoluţie continuă şi notabilă, dimensiunile şi solicitările funcţionale fiind permanent reduse, simultan cu creşterile înregistrate în indicatorii de fiabilitate şi facilităţile de exploatare.

In ceea ce priveşte terminologia, pe lângă denumirea de instalaţii capsulate în hexafluorură de sulf sunt utilizate noţiunile de celule blindate, staţii (posturi) de înaltă tensiune etanşate metalic (postes haute tension sous enveloppe métallique, PSEM) respectiv instalaţii de comutaţie cu izolaţie în gaz (Gas Insulated Switchgear, GIS).

Construcţia şi introducerea în exploatare a instalaţiilor capsulate, izolate cu hexafluorură de sulf, răspund următoarelor cerinţe [11], [14], [22], [17]:

a) Necesitatea transportului energiei electrice la tensiuni înalte până în centrele de consum (oraşe, întreprinderi industriale etc.), cu respectarea restricţiilor impuse privind reducerea accentuată a suprafeţelor ocupate cu echipament.

Folosirea tensiunilor înalte pentru transportul energiei electrice până la consumatori prezintă considerabile avantaje economice, constând în economisirea unor însemnate cantităţi de metale neferoase (cupru, aluminiu) care altfel ar trebui consumate pentru realizarea instalaţiilor de distribuţie de medie tensiune.

In tehnica tradiţională, staţiile de transformare sau de conexiuni de înaltă tensiune ocupă un spaţiu mult mai mare decât

cele de medie tensiune, datorită necesității de a se asigura distanțele de izolație în aer între elementele constructive funcționând la potențiale diferite.

O instalație de înaltă tensiune realizată în variantă capsulată cu izolație în hexafluorură de sulf ocupă circa 10...20% din suprafața unei stații tradiționale de tip deschis, îmbinând astfel avantajele injecției de putere la tensiune înaltă cu cele care decurg din reducerea substanțială a suprafeței ocupate cu echipament.

b) Limitarea și chiar eliminarea solicitărilor produse de factorii de mediu asupra echipamentului electric.

In cazul instalațiilor capsulate izolate cu hexafluorură de sulf, efectele acțiunii factorilor de mediu sunt practic eliminate deoarece elementele constructive funcționează în întregime în incinte metalice din oțel sau aluminiu, în care se găsește hexafluorura de sulf la presiuni de 0,3...0,4 MPa. Deoarece blindajul metalic al acestor instalații este legat la pământ, se obține ecranarea totală a căilor conductoare, cu efecte benefice sub raportul cerințelor de compatibilitate electromagnetică în instalațiile de joasă frecvență. Influențele poluării naturale sau chimice 'sunt complet eliminate.

c) Creșterea gradului de siguranță în funcționarea instalațiilor, prin eliminarea posibilităților de producere a avariilor sub acțiunea unor cauze întâmplătoare. Elementele constructive ale instalațiilor capsulate sunt complet inaccesibile din exterior, încât gradul de securitate împotriva electrocutărilor este foarte ridicat. De asemenea este înlăturat orice pericol de explozie, obținându-se astfel un avantaj foarte important, în special pentru instalațiile destinate funcționării în medii explozive (minerit, industrie chimică, armament etc.). Caracterizarea diferitelor generații de instalații capsulate poate fi făcută în raport cu următorii parametri: numărul polilor conținuți în fiecare blindaj (instalații monopolare, respectiv tripolare) și realizarea separată sau grupată a funcționalităților.

Primele generații de instalații de acest tip au fost monopolare și cu funcționalități separate, [17]; întrerupătoarele, separatoarele de bare și cele de legare la pământ, transformatoarele de măsură, sistemele de bare și restul echipamentelor erau etanșate

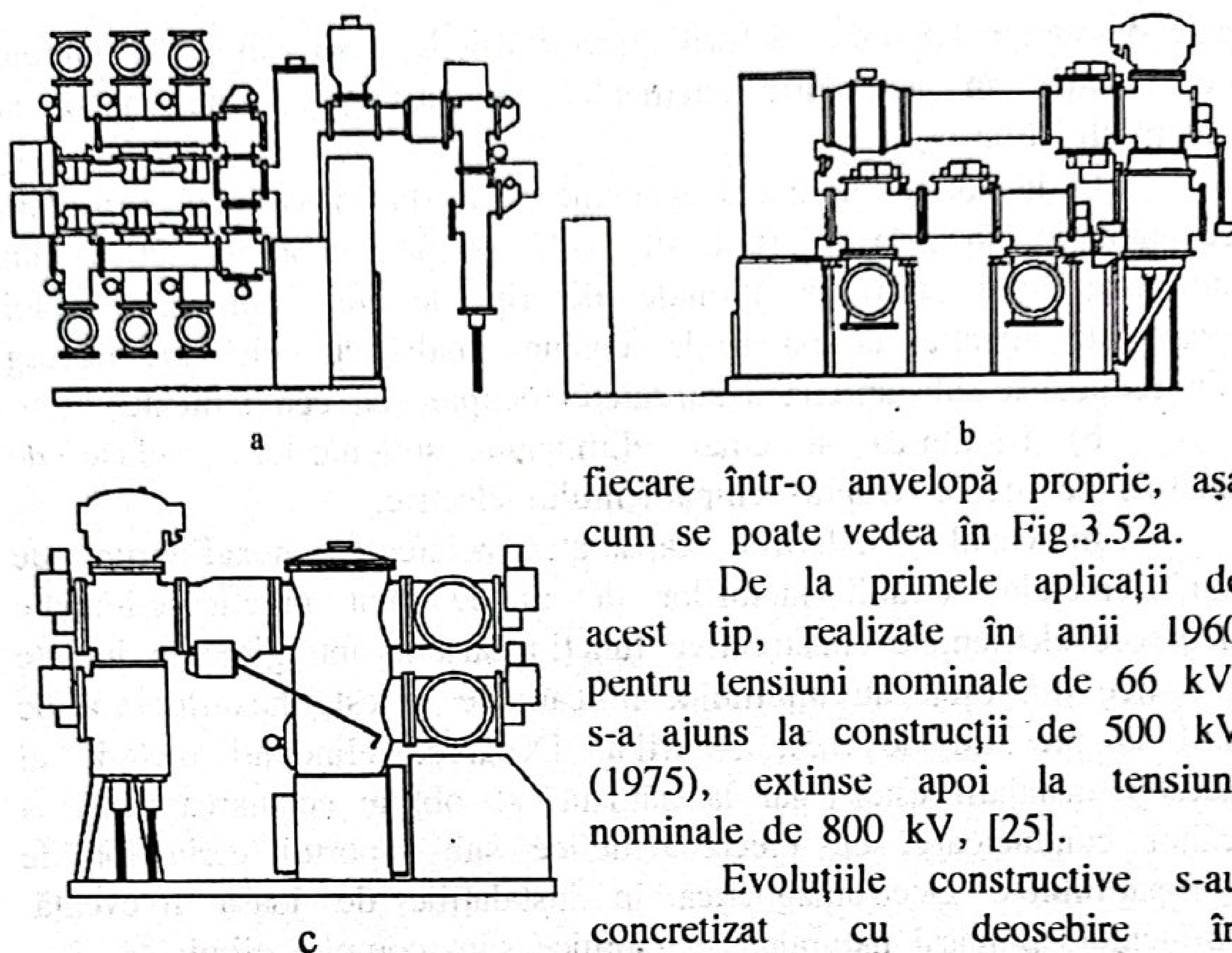


Fig.3.52
Generaţii de instalaţii blindate în SF_6

fiecare într-o anvelopă proprie, aşa cum se poate vedea în Fig.3.52a.

De la primele aplicaţii de acest tip, realizate în anii 1960 pentru tensiuni nominale de 66 kV, s-a ajuns la construcţii de 500 kV (1975), extinse apoi la tensiuni nominale de 800 kV, [25].

Evoluţiile constructive s-au concretizat cu deosebire în compactizare şi miniaturizare, ajungându-se la instalaţii tripolare (Fig.3.52b) şi, în sfârşit, la construcţii în care funcţionalităţile sunt grupate [17], [30] (Fig.3.52c).

Construcţiile şi domeniul de utilizare al instalaţiilor capsulate au fost extinse şi spre medie tensiune, în prezent existând echipament de acest tip care acoperă domeniul tensiunilor nominale între limitele 7,2...800 kV. Cu titlu de exemplu, în Fig.3.53 se prezintă o gamă a instalaţiilor capsulate cu izolaţie în hexafluorură de sulf, fabricate în prezent de ABB, [4].

La tensiuni de până la 170 kV, ieşirea din instalaţia blindată are loc prin cablu; peste acest nivel de tensiune, conexiunea se face în mod obişnuit la o reţea aeriană, printr-un izolator umplut cu gaz SF_6 sub presiune.

Intrerupătorul de linie este conectat la un sistem de bare realizat de asemenea de tip capsulat; pentru niveluri mai scăzute de tensiune, cei trei poli ai întrerupătorului şi barele colectoare sunt

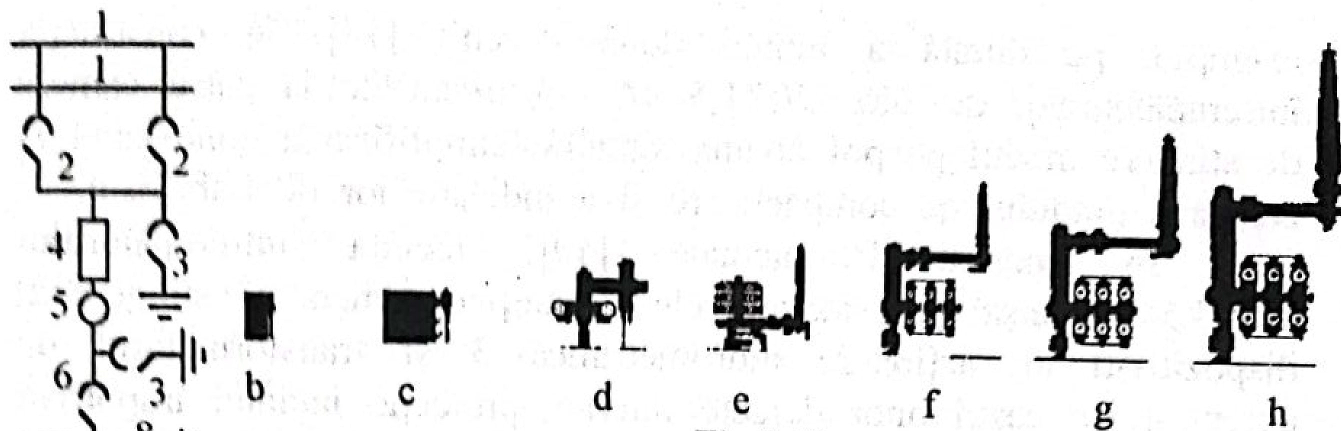


Fig.3.53

Instalaţii capsulate în SF_6 de fabricaţie ABB: a-schema electrică; b-EAK/7,2...36 kV/2500 A/31,5 kA; c-ENK/52...72 kV/2500 A/31,5 kA; d-ELK 0/72...170 kV/3150 A/40 kA; e-ELK 1/170...245 kV/4000 A/63 kA; f-ELK 2/245...362 kV/4000 A/63 kA; g-ELK 3/362...550 kV/6300 A/63 kA; h-ELK 4/550...800 kV/6300 A/50 kA.

capsulate în carcasă unică în timp ce, pentru tensiuni nominale superioare nivelului de 170 kV, fiecare fază este prevăzută cu blindaj propriu.

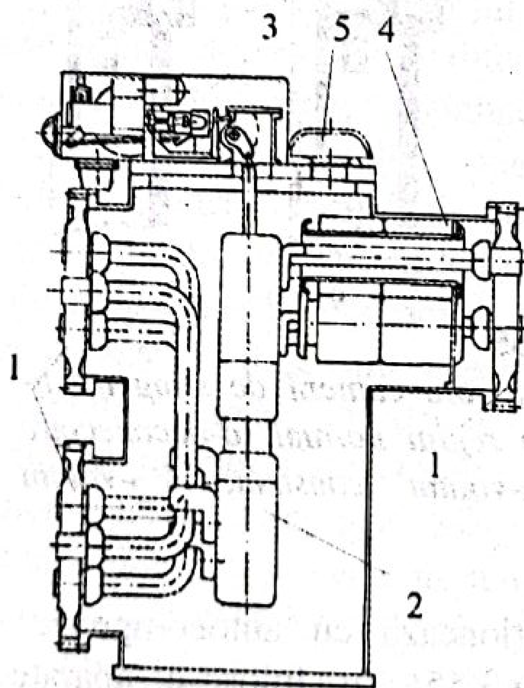


Fig.3.54

Compartimentul întrerupătorului: 1-izolatoare de trecere; 2-cameră de stingere; 3-mecanism de acţionare; 4-transformator de curent; 5-supapă de siguranţă.

In instalaţiile capsulate cu izolaţie în hexafluorură de sulf sunt amplasate echipamente de acelaşi tip cu cele utilizate în instalaţiile convenţionale, cu adaptări mai mult sau mai puţin importante, în vederea funcţionării în condiţii de etanşeitate completă.

Importante progrese au fost introduse în realizarea întrerupătoarelor concretizate, în special, prin reducerea numărului de camere de stingere modul (locuri de întrerupere) înseriate pe pol, pentru aceeaşi valoare a capacităţii nominale de deconectare la scurtcircuit; de

exemplu, pe durata a numai două decenii [15], în construcţia întrerupătoarelor de 245 kV/31,5 kA s-a trecut de la patru camere de stingere modul pe pol la una singură, simplificarea conducând la creşterea gradului de compactizare şi a indicatorilor de fiabilitate.

In construcţiile actuale [40], incinta întrerupătorului (Fig.3.54), etanşat prin izolatoarele 1, conţine camera de stingere 2, dispozitivul de acţionare hidromecanică 3 şi transformatorul de curent 4. In cazul unor defecte interne, protecţia incintei împotriva exploziei este asigurată prin supapa de siguranţă 5.

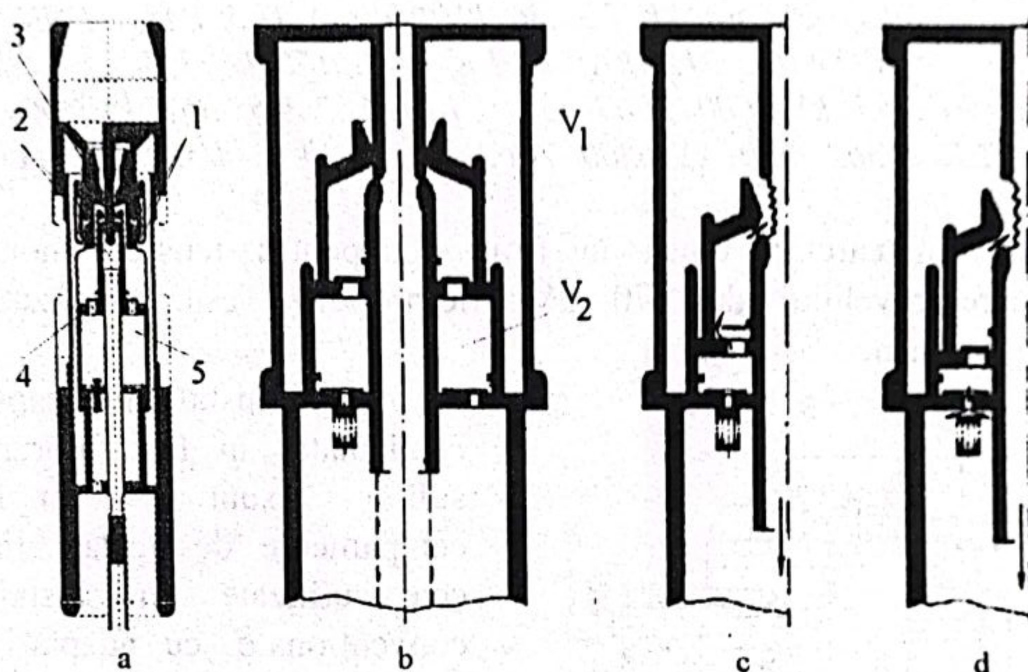


Fig.3.55

Construcţia întrerupătorului: a-ansamblu cameră de stingere; b-contacte închise; c-deconectare în regim normal; d-deconectare în regim de scurtcircuit; V_1-volum constant; V_2-volum comprimabil.

Intrerupătoarele utilizate funcţionează cu autocompresie dar, în construcţiile de ultimul tip, Fig.3.55, se folosesc aparate cu autocompresie asistată de autoexpansiune, [40].

Partea activă a întrerupătorului (Fig.3.55a) este compusă din contactele de lucru respectiv de rupere 1, 2, ajutajul electroizolant 3 şi pistonul mobil 4; sub acesta se delimitează volumul de gaz 5, care poate exercita suflaj în două etape asupra coloanei arcului electric. Poziţia relativă a componentelor camerei de stingere în

cazul întrerupătorului închis este prezentată în Fig.3.55b. Volumele de gaz V_1 și V_2 au aceeași destinație, dar intervin în mod diferit.

La întreruperea curenților de mică intensitate, inclusiv a celor de regim normal (Fig.3.55c) suflajul asupra arcului electric este obținut prin autoexpansiune (V_1) completată, dacă este cazul, printr-o componentă provenind din autocompresie (V_2); la deconectarea curenților de scurtcircuit (Fig.3.55d) suflajul se constituie numai ca urmare a autoexpansiunii gazului din volumul V_1. Fiind posibilă recuperarea parțială a energiei arcului electric prin autoexpansiunea gazului, acționarea acestor întrerupătoare necesită dispozitive de acționare simplificate, cu nivel redus al energiei înmagazinate și cu indicatori de fiabilitate ameliorați.

Construcția separatoarelor utilizate în instalațiile capsulate cu izolație în hexafluorură de sulf are elemente specifice, ținând seama și de destinația acestor echipamente în instalațiile tradiționale, anume aceea de a face nemijlocit vizibilă separarea electrică a anumitor circuite. Deoarece vizibilitatea în interiorul blindajului nu este posibilă, pentru controlul deschiderii complete a contactelor separatoarelor s-a recurs la diferite metode, unele între timp părăsite (intercalarea de ecrane metalice legate la pământ între contactele deschise ale separatorului, practicarea unor hublouri în blindajul celulelor pentru controlul vizual al deschiderii complete a contactelor). In construcțiile actuale se utilizează indicatoare de poziție amplasate în exteriorul compartimentului separatorului, legate la contactele mobile ale acestuia și capabile să semnalizeze fără ambiguitate starea aparatului la un moment dat. Posibilitatea deteriorării nivelului de izolație dintre contactele deschise ca urmare a unor pierderi de gaz SF_6 este preîntâmpinată prin utilizarea manometrelor compensate în temperatură, capabile să detecteze orice scădere accidentală a presiunii.

Dispozitive de control similare sunt prevăzute și pentru confirmarea închiderii ferme a contactelor separatoarelor de legare la pământ.

Transformatoarele de curent sunt de tip toroidal, adaptate pentru a putea fi amplasate direct pe cablurile de înaltă tensiune, dacă instalația capsulată este racordată la o rețea în cablu; în alte

variante, acestea sunt amplasate în compartimentul întrerupătorului, Fig.3.54.

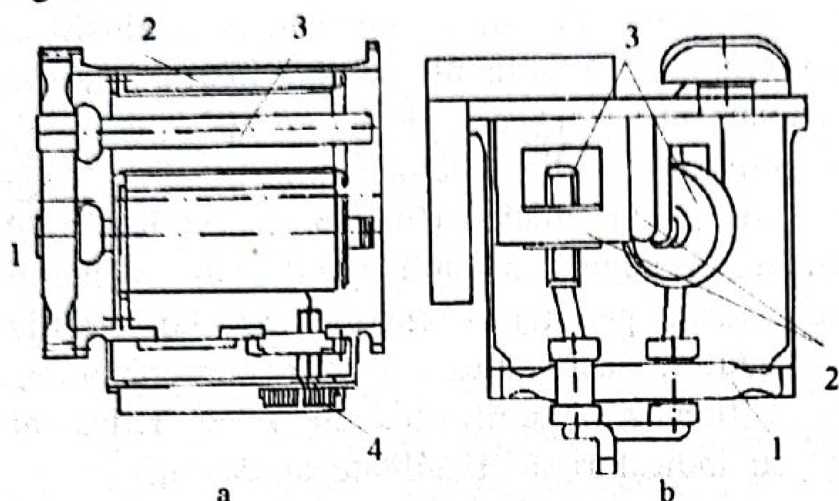


Fig.3.56

Transformatoare de măsurare: a-transformator de curent; b-transformator de tensiune: 1-izolator de trecere și etanșare; 2-miez feromagnetic; 3-înfășurare primară; 4-regletă de borne.

Noi tipuri de transformatoare de curent sunt avute în vedere, [17]: transformatoare magnetice de putere redusă, utilizarea efectului Faraday etc. Transformatoarele de tensiune pot fi de inducție sau divizor capacitiv. Construcțiile, [40], sunt prezentate în Fig.3.56.

Sistemul de gaz al unei instalații capsulate este constituit dintr-o succesiune de compartimente, detașabile și separate cu ajutorul unor izolatoare de etanșare (Fig.3.57), fiecare conținând elementele de structură necesare: jocurile de bare, aparatajul de comutație, de măsurare, plecările în cablu etc. Pentru întrerupător compartimentarea este necesară în vederea limitării, la un volum cât mai redus, a împrăștierii substanțelor de descompunere a gazului SF_6, produsă sub acțiunea arcului de

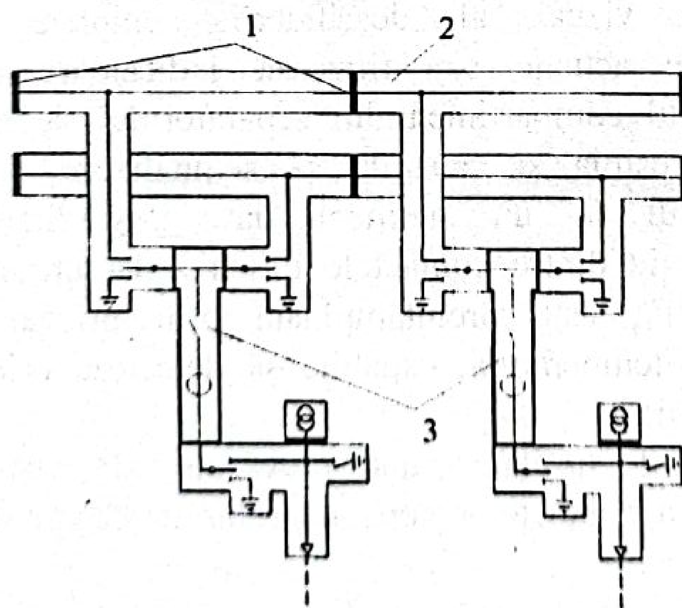


Fig.3.57

Sistem de capsulare: 1- izolator de trecere și etanșare; 2-compartiment pentru bare; 3-incinta întrerupătorului.

deconectare. Pentru restul echipamentului, prin compartimentare se urmărește pe de o parte limitarea spațială a efectelor unor eventuale defecte interne, cu repercursiuni pozitive și asupra disponibilității instalației, iar pe de altă parte posibilitatea de extindere fără cheltuieli excesive, [15].

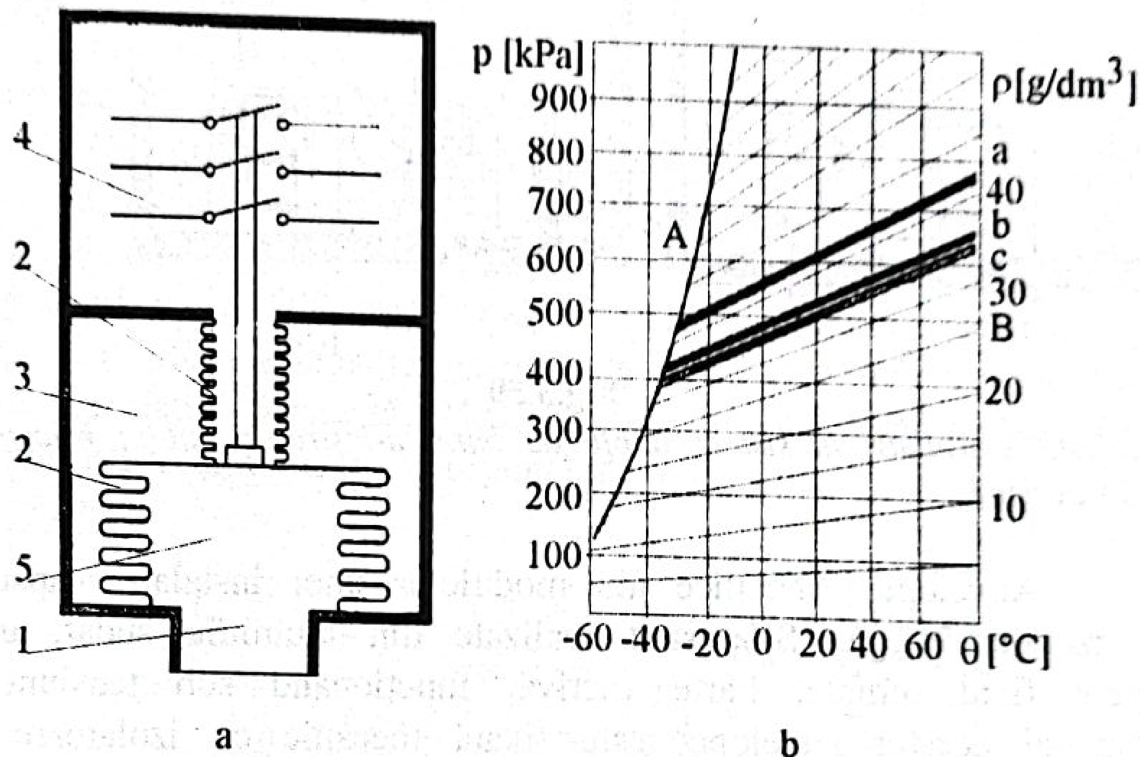


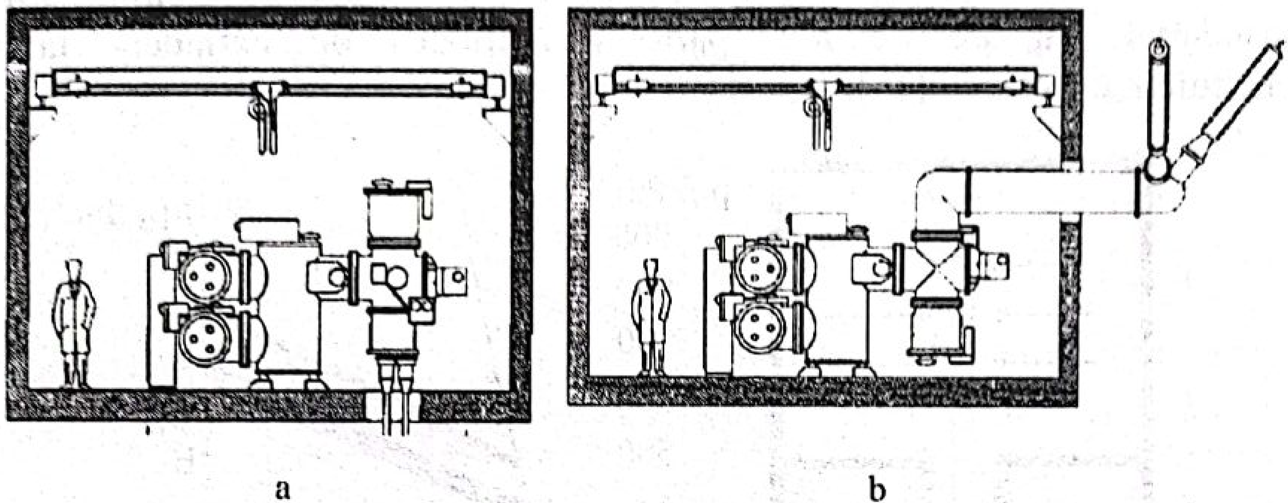
Fig.3.58

Manometru de contact și caracteristici de funcționare

Presiunea gazului în compartimentele unei instalații capsulate este supravegheată cu manometre de contact termocompensate (joje de densitate). Configurația unei joje de densitate pentru hexafluorură de sulf și caracteristicile de funcționare ale acesteia, utilizabile și în construcția întrerupătoarelor [41], sunt date în Fig.3.58.

Joja (Fig.3.58a) permite efectuarea măsurării pe baza principiului comparației; densitatea gazului supravegheat, existent în compartimentul 5, este comparată în permanență cu cea corespunzătoare gazului din incinta de referință 3. La temperatură variabilă, punctul de funcționare normală (fără pierderi de gaz) se situează pe curba a (Fig.3.58b); curba b corespunde densității gazului din incinta de referință a jojei. Dacă densitatea scade sub această valoare, un microcontact semnalizează necesitatea completării cu hexafluorură de sulf. In cazul unor pierderi importante de gaz

(densitate sub nivelul dat de curba c), un al doilea semnal blochează funcţionarea întrerupătorului sau a instalaţiei capsulate.



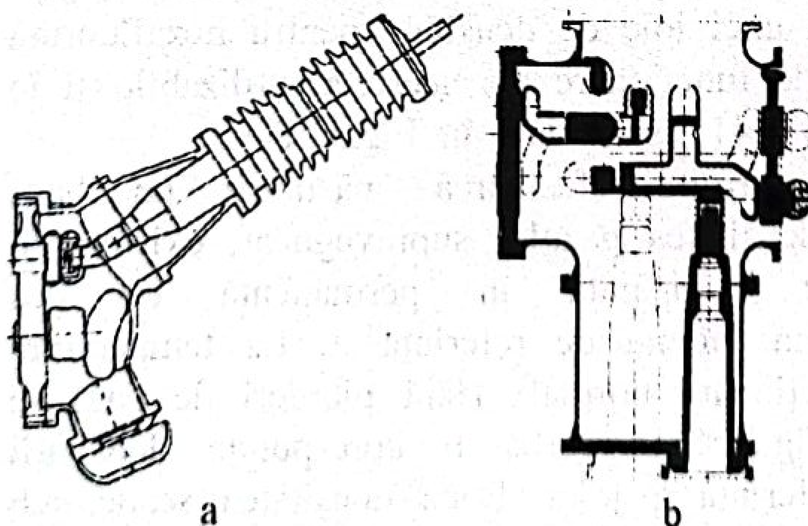
a b

Fig.3.59

Instalaţii capsulate cu sistem dublu de bare; a-ieşire în cablu; b-ieşire în linie aeriană.

Anvelopele metalice ale modulelor unei instalaţii capsulate cu izolaţie în gaz SF_6 sunt realizate din aluminiu sudat, unele repere fiind turnate. Partea activă, funcţionând sub tensiune în interiorul acestor anvelope, este fixată mecanic cu izolatoare din răşină pe bază de siliciu. Anvelopa metalică a fiecărui modul este legată la pământ în ambele capete.

Instalaţiile capsulate cu izolaţie în hexafluorură de sulf se pot conecta în diferite moduri la echipamentul instalaţiei complexe din care fac parte, [40]; astfel este posibilă ieşirea în linie fie subterană, fie aeriană (Fig.3.59a,b) sau racordarea directă la transformatorul de putere.



a b

Fig.3.60

Compartimente de ieşire: a-în LEA; b-în LEC.

Construcţia unui izolator de trecere în SF_6, care permite racordarea la o linie aeriană sau la

transformator [40], este prezentată în Fig.3.60a.

Izolatoarele de trecere sunt realizate în mod obişnuit de tip condensator, cu izolaţie de hârtie impregnată în răşină epoxidică; la exterior construcţia este protejată printr-o anvelopă de porţelan. Izolatoarele sunt umplute cu hexafluorură de sulf la presiunea existentă în întreaga instalaţie.

Construcţiile cu ieşire în cablu, Fig.3.60b, sunt realizate obişnuit pentru tensiuni nominale de 72,5...245 kV, mai rar pentru 420 kV. Cablurile cu izolaţie în ulei au fost înlocuite prin cabluri uscate, cu izolaţie sintetică sau chiar cu izolaţie gazoasă. In acest sens se citează legăturile trifazate de evacuare a puterii de la câteva din grupurile de 900 MW existente în centralele nucleare din Franţa, realizate cu izolaţie gazoasă în maniera sistemului de bare dintr-o instalaţie capsulată, [15]; acelaşi tip de legături [4], [43], sunt construite şi utilizate tradiţional de ABB.

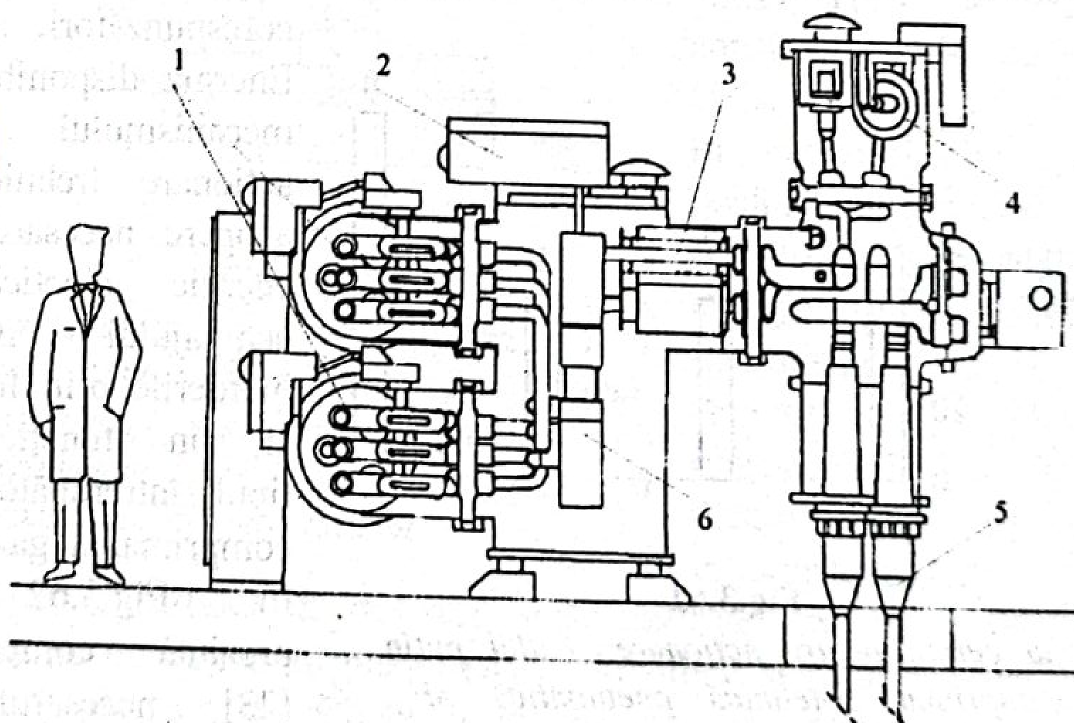


Fig.3.61

Instalaţie capsulată cu izolaţie în hexafluorură de sulf (ABB): 1-bare colectoare; 2-mecanism de acţionare; 3-transformatoare de curent; 4-transformatoare de tensiune; 5-ieşire în cablu; 6-întrerupător.

Fiind construite integral pe principiul modulului, instalaţiile capsulate pot reproduce orice schemă de staţie de transformare, indiferent de tipul sistemului de bare colectoare: dublu, în H, în

inel, etc. In Fig.3.61 este prezentată arhitectura unei instalații blindate cu izolație în hexafluorură de sulf și ieșire în cablu, de construcție recentă, [40].

3.8. Acționarea întrerupătoarelor cu hexafluorură de sulf

Mecanismul de acționare al unui întrerupător de putere trebuie să posede capabilitatea de a acumula o anumită cantitate de energie pe care să o elibereze la comandă; aceasta servește pentru deplasarea cu viteză impusă a echipajului mobil, atât la deschiderea cât și la închiderea întrerupătorului.

La alegerea tipului de acționare pentru un întrerupător, patru cerințe importante trebuie avute în vedere și anume: energie redusă de comandă, posibilități de execuție a unei game largi de manevre, mentenanță și preț de valori reduse, indicatori de fiabilitate corespunzători.

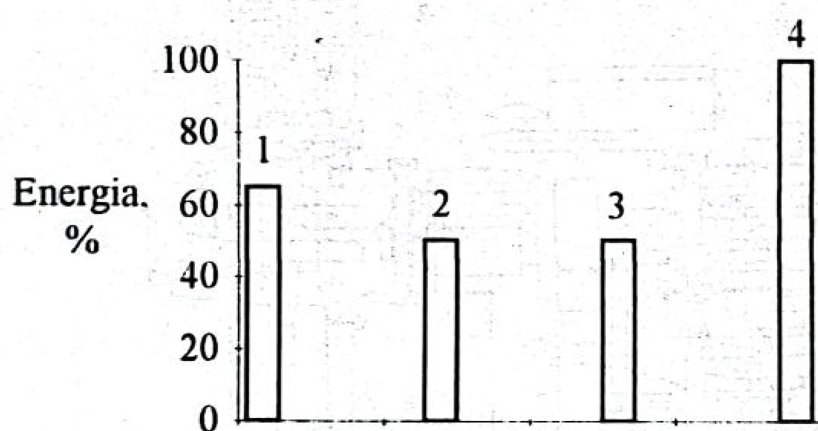


Fig.3.62

Energia cerută pentru acționare: 1-ulei puțin. 2-aer comprimat, 3-tehnică pneumatică SF_6. 4-tehnică autopneumatică SF_6.

Energia disponibilă a mecanismului de acționare trebuie să acopere necesarul de energie cinetică a echipajului mobil, pierderile prin frecare și, în funcție de tipul întrerupătorului, comprimarea gazului. In Fig.3.62 se prezintă comparativ [23], necesarul de energie pentru acționarea diferitelor tehnici în comutația de putere; întrerupătoarele cu autocompresie necesită energii de valori mari, care parțial se consumă pentru comprimarea gazului SF_6.

Combinarea diferitelor tehnici de stingere a arcului electric (autocompresia asistată de autoexpansiune, suflajul magnetic) a permis, pe lângă ameliorarea parametrilor electrici și minimizarea

energiei necesare pentru acționare, o parte din energia arcului electric însuși fiind recuperată în acest scop. In Fig.3.63 se prezintă evoluția energiei disponibile a mecanismului de acționare în funcție de capacitatea de deconectare la scurtcircuit și de tehnica de comutație [12], [23]. Astfel, dacă un întrerupător în tehnică autopneumatică necesită de regulă 1 kJ pentru deconectarea unui curent de scurtcircuit de 40...50 kA, soluția combinată, autoexpansiune și arc turnant, poate opera cu o energie de doar 300 J pentru aceeași intensitate a curentului de defect.

Utilizarea autoexpansiunii ca procedeu de suflaj al arcului electric permite recuperarea unei importante părți din energia pusă în joc la deconectare, procentul atins fiind, la unele construcții [24], de circa 50%.

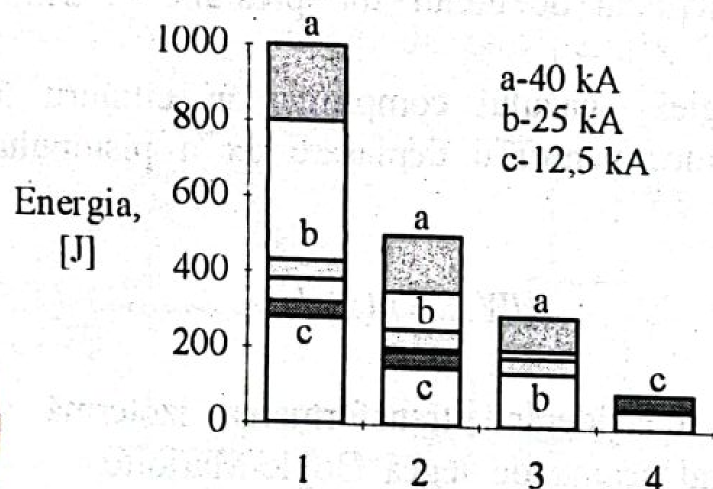


Fig.3.63

Energia mecanismului de acționare : 1- tehnica autopneumatică, 2- tehnica autopneumatică și autoexpansiune. 3- autoexpansiune și arc turnant. 4- autoexpansiune sau arc turnant.

In acest fel devine posibilă acționarea cu consum scăzut de energie, deci utilizând mecanisme simple, cu resorturi. Practica obișnuită însă arată că pentru acționarea întrerupătoarelor de putere cu hexafluorură de sulf sunt utilizate, de la caz la caz, mecanisme de acționare pneumatice, hidraulice sau cu resorturi.

Experiența dobândită în exploatarea întrerupătoarelor cu aer comprimat a fost hotărâtoare în ceea ce privește renunțarea rapidă la acționarea pneumatică datorită, evident, inconvenientelor majore caracteristice: funcționare dificilă în codiții de umiditate crescută și necesitatea utilizării compresoarelor, agregate cu fiabilitate scăzută.

Deși inițial peste 60% din întrerupătoarele autopneumatice cu hexafluorură de sulf au fost acționate pneumatic, din motivele menționate sistemul a înregistrat un permanent regres încât, în

1983, mai era utilizat doar în circa 10% din cazuri. În schimb, s-a înregistrat o extindere a comenzii hidraulice care, în aceeaşi perioadă, echipa 80% din totalul acestor întrerupătoare, [23].

Mecanismele de acţionarea de tip oleopneumatic, satisfăcând cerinţele impuse, utilizează drept acumulator de energie un gaz sub presiune. Comprimarea gazului şi transmisia mişcării la contactele mobile ale întrerupătorului se obţin pe cale hidraulică, cu ajutorul uleiului sub presiune.

Principiul acumulării energiei [14], este ilustrat în Fig.3.64: o anumită cantitate de azot 1 este comprimată în cilindrul 2 cu ajutorul pistonului liber 3, acţionat de uleiul sub presiune 4, trimis de o pompă.

Variaţia dW a energiei gazului comprimat în cilindru la presiunea p(x), care se produce pentru o deplasare dx a pistonului 3, este dată de relaţia:

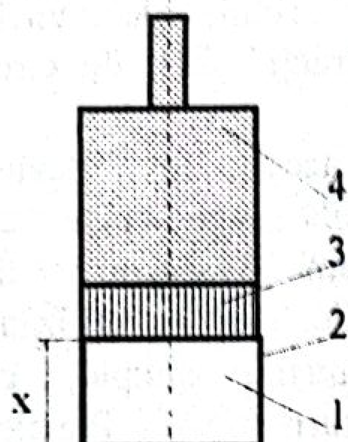


Fig.3.64
Principiul acumulării energiei

$$dW = S\,p(x)\,dx \tag{3.6}$$

sau, considerând transformarea izotermă şi ţinând seama de legea Boyle-Mariotte:

$$dW = \frac{S p_0 x_0}{x} dx, \tag{3.7}$$

unde, conform Fig.3.64, S reprezintă suprafaţa de lucru a pistonului 3, iar p_0, x_0-valorile iniţiale ale presiunii, respectiv cursei pistonului.

Pentru energia W, eliberată de gazul acumulator la deplasarea pistonului între limitele x_i, x_f ($x_i < x_f$), corespunzătoare respectiv valorilor maximă, p_i şi minimă, p_f ale presiunii, prin integrare se obţine:

$$W = S p_0 x_0 \ln\left(\frac{x_f}{x_i}\right). \tag{3.8}$$

In ipoteza că transformarea rămâne de tip izoterm, ţinând seama din nou de legea Boyle-Mariotte, relaţia (3.8) se poate pune sub forma finală:

$$W = p_0 V_0 \ln\left(\frac{p_i}{p_f}\right), \quad (3.9)$$

V_0 fiind volumul iniţial al gazului acumulator.

Pe baza acestui principiu, comprimarea la circa 30 MPa a unei anumite cantităţi de azot permite înmagazinarea unei energii de aproape 10 kJ.

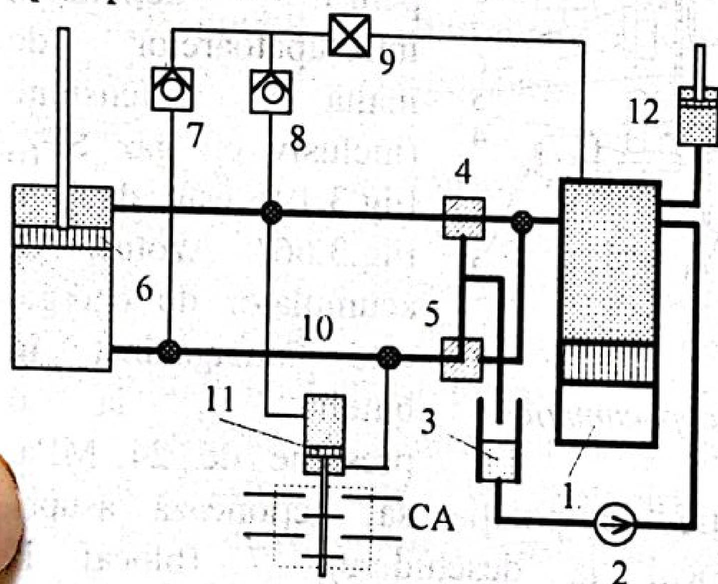


Fig.3.65
Schema de principiu a mecanismului de acţionare oleopneumatic

Funcţionarea mecanismului are loc după schema prezentată în Fig.3.65. Drept acumulator de energie serveşte cantitatea de azot 1, comprimată cu ajutorul uleiului hidraulic trimis sub presiune de pompa 2, din rezervorul 3. Pentru acţionarea la închidere sau deschidere a întrerupătorului, se comandă deschiderea căii principale corespunzătoare electrovalvelor 4, respectiv 5. Uleiul sub presiune acţionează pe una din feţele pistonului cu dublu efect 6, determinând deplasarea acestuia şi închiderea sau deschiderea contactelor întrerupătorului; uleiul de pe faţa opusă este recirculat în rezervorul 3.

Ventilele de întoarcere 7, 8 asigură menţinerea conductelor de după electrovalvele 4, 5 la o presiune de câteva atmosfere, pentru a împiedica pătrunderea aerului; uleiul necesar în aceste ramuri ale instalaţiei este preluat din cilindrul acumulator prin intermediul reductorului de presiune 9.

Mecanismul oleopneumatic este prevăzut cu cilindrul auxiliar 10 în care, prin deplasarea pistonului imagine 11, este reprodusă poziţia pistonului principal 6 şi sunt comutate contactele auxiliare CA, ale întrerupătorului. Presostatul 12 are rolul de a controla presiunea uleiului şi de a bloca acţionarea în ciclu închis-deschis a întrerupătorului, dacă aceasta scade.

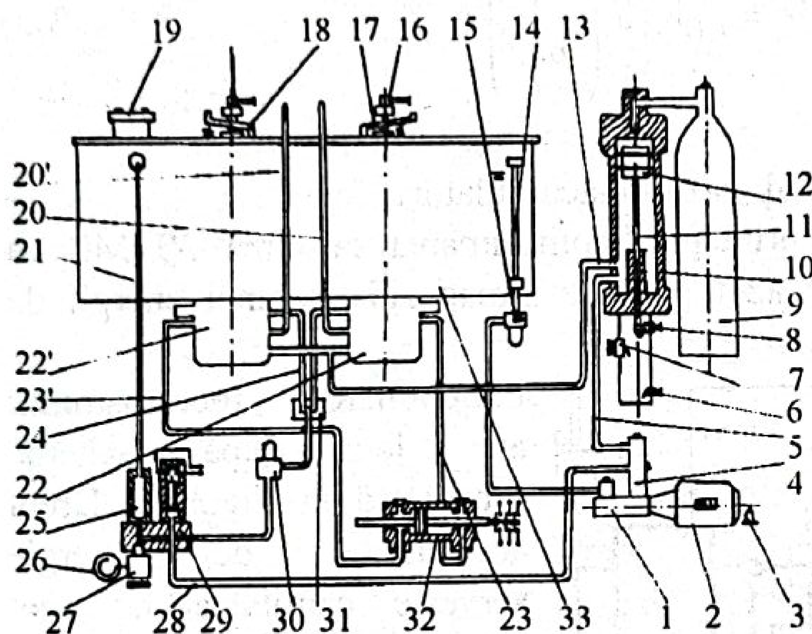


Fig.3.66

Construcţia mecanismului oleopneumatic

Schema de ansamblu a unui mecanism oleopneumatic fabricat de SC Electroputere Craiova, utilizat pentru acţionarea întrerupătoarelor de înaltă tensiune (inclusiv cu gaz SF_6, Fig.3.19) este dată în Fig.3.66. Azotul, ca acumulator de energie este înmagazinat în butelia 9, la o presiune de 24 MPa. Tija pistonului 11, în funcţie de poziţia sa, acţionează asupra microîntrerupătoarelor 6 (blocaj la deschidere), 7 (blocaj la închidere), sau 8 (pornirea pompei). Motorul asincron 2 acţionează pompa de înaltă presiune 1 care, prin filtrul 15, absoarbe uleiul din rezervorul 33 şi îl trimite sub presiune prin supapa 4 şi conducta 5 la cilindrul 10 al acumulatorului, respectiv prin conducta 28, la blocul distribuitor. De la acumulator uleiul ajunge, prin conducta 13, la valvele de comandă 22, 22'. Blocul distribuitor susţine presostatul 29 care, prin contactele sale de ieşire, blochează comanda de acţionare a întrerupătorului, dacă presiunea uleiului scade sub valori reglate.

Blocul de control 27 permite descărcarea uleiului printr-un robinet şi urmărirea valorilor presiunii înalte, pe manometrul 26. Supapa de siguranţă 25, racordată prin conducta 21, are rol de protecţie la suprapresiuni. Reductorul de presiune 30 menţine în

conductele din avalul valvelor 22, 22' o presiune superioară celei atmosferice, pentru a împiedica pătrunderea aerului în această parte din instalaţie. Poziţia întrerupătorului este semnalizată cu ajutorul pistonului imagine din cilindrul 32, racordat la instalaţie prin conductele 23, 23'. Tubul transparent 14 permite urmărirea nivelului uleiului, care poate fi completat prin buşonul 19.

Comanda valvelor de închidere-deschidere 22, 22' se face prin intermediul pîrghiilor 17, cu care sunt prevăzute electrovalvele 16, 18; uleiul sub presiune este trimis la instalaţiile de execuţie prin una din conductele 20, 20'.

Comparativ cu alte mecanisme de acţionare, cel oleopneumatic prezintă următoarele avantaje, [14]:

-transmisia mişcării, de la acumulatorul de energie la echipajul mobil al întrerupătorului, se face pe cale hidraulică, evitându-se astfel neajunsurile unui lanţ cinematic cu piese în mişcare;

-energia acumulată specifică (raportată la volumul elementului acumulator) are valori mai mari decât în cazul mecanismelor de acţionare cu resorturi;

-se elimină dispozitivele de acroşare mecanică, având dezavantajul unei uzuri intense;

-ţevăria instalaţiei nu este sub presiune înaltă decât pe duratele foarte scurte ale deplasării echipajului mobil, fapt care diminuează considerabil intensitatea îmbătrânirii acesteia.

O variantă de real interes tehnic o constituie comanda hidromecanică, mecanismul de acţionare funcţionând cu acumulare de energie în resort şi transmisie hidraulică. Costrucţii de acest tip (Fig.3.67) echipează întrerupătoarele cu hexafluorură de sulf de fabricaţie ABB [41], [4].

Comanda hidromecanică (Fig.3.67a) se compune în esenţă dintr-un ansamblu format din resorturile de tip disc 1 şi un bloc hidraulic. Transmisia energiei acumulate se face de la pistonul 2 al acumulatorului, prin intermediul verinei hidraulice 3, la echipajul mobil al întrerupătorului.

In Fig.3.67b se prezintă construcţia unui pol al întrerupătorului tip ELF SP [41], din care rezultă modul de amplasare a comenzii hidromecanice (reperul 4).

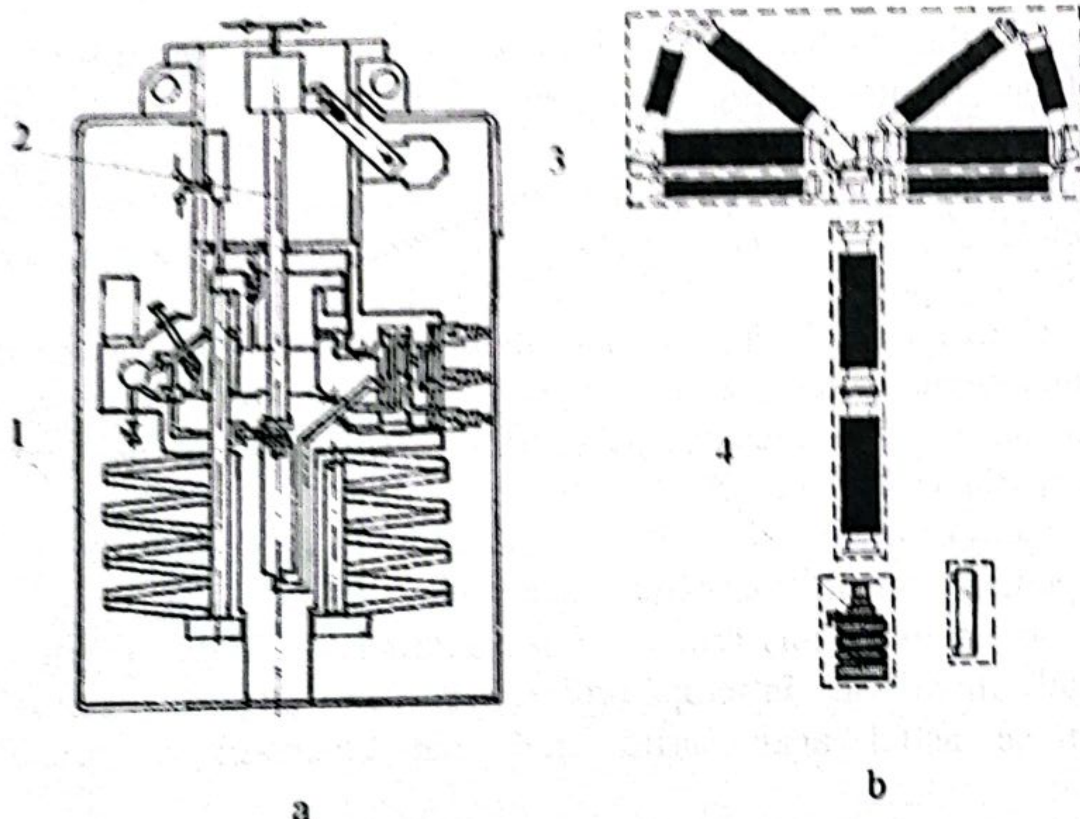


Fig.3.67

Comanda hidromecanică: a-ansamblu constructiv: 1-resort acumulator; 2-piston; 3-verină hidraulică; b-amplasare pe întrerupător ELF SP (ABB): 4-mecanism de acționare.

Mecanismul este prevăzut cu posibilitate de comandă de la distanță și cu sisteme de supraveghere și blocare a acționării în cazul unei acumulări insuficiente de energie în resorturi.

Dată fiind rata în general înaltă de defectare din cauze de natură mecanică a unui întrerupător, cifrată la valori de 80...90% din totalul defectelor [23], o cerință de maximă importanță impusă mecanismului de acționare se referă la indicatorii săi de fiabilitate; aceștia pot fi ameliorați prin simplificarea la maximum a construcției.

Deși nu pot înmagazina decât energii de valori mai mici, mecanismele cu resorturi oferă o soluție de stocare sigură a energiei și se caracterizează prin acționare precisă; se utilizează pentru acționarea întrerupătoarelor cu hexafluorură de sulf de fabricație recentă.

Comanda cu acumulare de energie în resorturi se exemplifică prin mecanismul de acționare tip BLG, de fabricație

ABB. Modul de operare și componentele principale ale mecanismului pot fi urmărite pe Fig.3.68, [48].

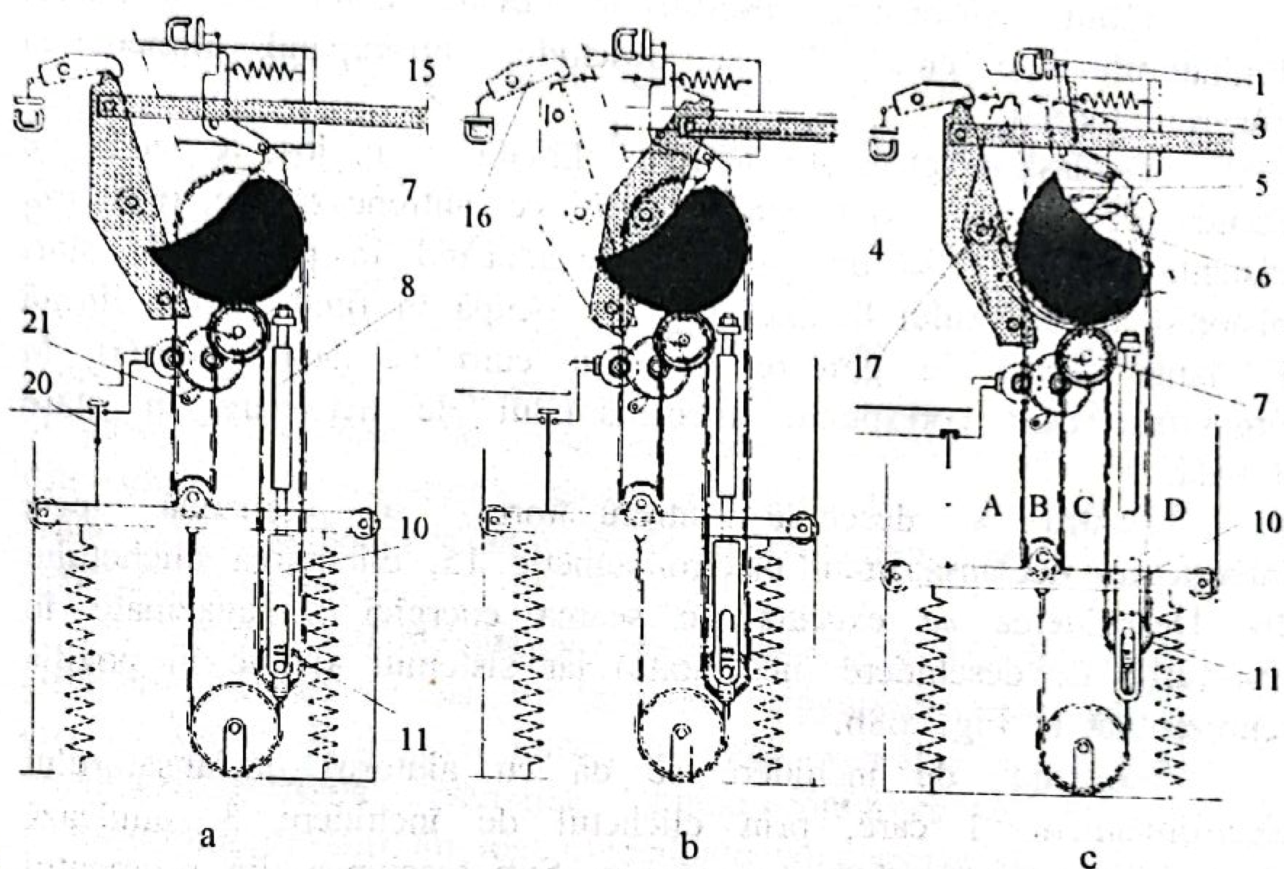


Fig.3.68

Comandă cu acumulare de energie în resorturi tip BLG ABB: a-mecanism în stare armată; b-starea mecanismului după efectuarea operației de deschidere; c-starea mecanismului după efectuarea operației de închidere.

Armarea resorturilor de închidere 24 (Fig.3.68a) se obține cu ajutorul electromotorului 19 care, prin intermediul reductorului de turație 18, antrenează roata dințată 7 în sensul indicat.

Roata dințată 5 și cama 6 sunt blocate prin intermediul clichetului de închidere 3. Capetele lanțului de antrenare 9 sunt fixate pe roțile dințate 5, 7 încât, pe durata armării, segmentele B, C se deplasează în sensul indicat, în timp ce porțiunile A, D rămân fixe. Pe măsură ce lanțul de antrenare 9 se deplasează, roata 25 împreună cu puntea 22 urcă, roata 11 coboară, iar resorturile de închidere 24 sunt tensionate. Lanțul de antrenare 12 are rolul de a

menţine permanent întins lanţul 9, iar clichetul 21 blochează rotirea inversă a roţilor reductorului de turaţie 18.

Când tensionarea resorturilor devine completă, contactul limitatorului de cursă 20 se deschide, întrerupând alimentarea electromotorului.

Deplasările efectuate de roata dinţată 11 în jos, respectiv de puntea 22 în sus, sunt egale. După ce antrenează pe o scurtă distanţă în jos piesa de ghidare 10, aducând în poziţia de start pistonul amortizorului 8, axul roţii 11 ocupă în final poziţia limită în fanta piesei de ghidare 10, aşa cum se poate urmări în Fig.3.68a, care corespunde mecanismului de acţionare în stare armată.

Pentru a deschide întrerupătorul, se comandă, prin intermediul declanşatorului electromagnetic 15, eliberarea clichetului 16. Deschiderea se execută pe seama energiei înmagazinate în resorturile de deschidere (nefigurate) iar sistemul ajunge în poziţia reprezentată în Fig.3.68b.

Comanda de închidere se dă cu ajutorul declanşatorului electromagnetic 1 care, prin clichetul de închidere 3, anulează blocarea roţii dinţate 5 şi a camei 6. Sub tensiunea din segmentul A al lanţului 9, roata 5 şi cama 6 sunt acţionate în sensul indicat de săgeată. Cama 6, prin intermediul rolei 17, aduce levierul 4 în poziţia finală (Fig.3.68c), acroşat şi blocat de clichetul de deschidere 16. Axul roţii dinţate 11 parcurge lungimea fantei din piesa de ghidare 10, la capătul cursei de închidere mişcarea fiind frânată de amortizorul mecanic 8.

După rearmarea resorturilor, mecanismul de acţionare este adus în poziţia reprezentată în Fig.3.68a.

Mecanismul este prevăzut cu releu antipompaj, element de încălzire termostatat, contor de acţionări, indicatoare pentru starea resorturilor etc.

Protejat într-o carcasă din aluminiu rezistentă la coroziune, mecanismul de acţionare tip BLG cu înmagazinare de energie în resorturi, echipează întrerupătoarele de înaltă tensiune cu hexafluorură de sulf HPL-A, HPL-B (Fig.3.18), de fabricaţie ABB [37], [38], [48].

3.9. Utilizarea tehnicii de comutație în hexafluorură de sulf

Intrerupătoarele cu hexafluorură de sulf apar pe piața echipamentelor electrice după anul 1965, moment în care întrerupătoarele realizate în tehnica clasică (cu ulei puțin, cu aer comprimat etc.) împlineau 30...35 de ani de utilizare, [6].

In cele trei decenii de fabricare și comercializare a aparatelor cu comutație în hexafluorură de sulf, marile firme constructoare au ajuns fiecare la zeci de mii de exemplare vândute și puse în funcțiune. Au fost elaborate și studiate mii de proiecte din care doar o mică parte au fost transpuse în practică; tehnologiile au fost perfecționate în mod continuu, până la obținerea generațiilor actuale.

In pofida dezavantajelor menționate la § 3.2, întrerupătoarele cu două presiuni au fost multă vreme singurele versiuni de aparate cu hexafluorură de sulf intrate în mod avantajos în competiție cu tehnica tradițională. Avantajele tehnico-economice ale comutației în hexafluorură de sulf au fost evidențiate cu claritate abia după 1975, odată cu fabricarea și utilizarea primelor întrerupătoare cu autocompresie.

Compararea tehnico-economică a întrerupătoarelor realizate în diferite tehnologii (clasică, hexafluorură de sulf) și chiar a diferitelor variante constructive funcționând cu hexafluorură de sulf, trebuie făcută în funcție de masa specifică a acestora (obținută prin raportare la puterea de rupere și exprimată în kg/GVA) și nu în funcție de prețuri deoarece [23], în construcția întrerupătoarelor de putere cu ulei puțin, pneumatice și cu comutație în hexafluorură de sulf sunt necesare materii prime și cheltuieli de manoperă similare.

Progresele înregistrate în numai 15 ani (1965...1980), conținând și saltul produs prin introducerea tehnicii autopneumatice în locul celei cu două presiuni, pot fi ilustrate astfel, [23]: puterea de rupere a întrerupătoarelor crește de la 2 la 20 GVA, în timp ce masa specifică scade de la 1000 la 200 kg/GVA.

Evoluția tehnică în costrucția întrerupătoarelor cu comutație în hexafluorură de sulf se concretizează și în reducerea, de la o generație la alta, a numărului camerelor de stingere modul,

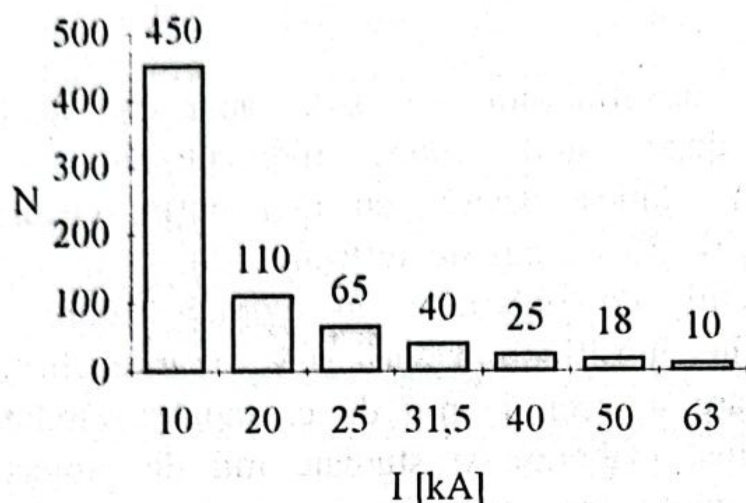


Fig.3.69
Numărul de întreruperi în funcţie de curentul întrerupt

reprezentând tot atâtea locuri de întrerupere pe pol. Efectele micşorării numărului de camere de stingere modul pe pol se reflectă nu numai în scăderea masei specifice, dar şi în construcţia generală a aparatului şi, cu deosebire în construcţia mecanismului de acţionare. Acesta se simplifică mult, deoarece energiile puse în joc devin mai mici. Micşorarea numărului de repere utilizate în construcţia întrerupătorului conduce, de asemenea, la creşterea valorilor indicatorilor de fiabilitate şi a mentenabilităţii.

Evoluţiile menţionate pot fi exemplificate în raport cu oricare din marile firme producătoare de echipament de comutaţie.

Astfel, întrerupătoarele firmei Siemens, în număr de 10.000 la sfârşitul anului 1987, erau prevăzute, în 1967, cu patru camere de stingere modul pe pol (245 kV/40 kA). In prezent, la aceeaşi tensiune şi pentru o capacitate de rupere la scurtcircuit de 50 kA, aceleaşi întrerupătoare sunt echipate doar cu o singură cameră modul pe pol; numărul detaliilor constructive utilizate a scăzut de circa trei ori, [27].

Mitsubishi Electric din Japonia a fabricat, începând cu 1965, 14.000 de întrerupătoare cu hexafluorură de sulf. In prezent, întrerupătoarele cu tensiunea de 300 kV sunt prevăzute cu o singură cameră modul pe pol, cele destinate instalaţiilor cu tensiunea nominală de 550 kV având doar două module, [26]. Capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit a acestor întrerupătoare a atins valoarea de 63 kA (110 kA în cazul întrerupătoarelor pentru generatoare).

Intrerupătoarele destinate instalaţiilor de transport al energiei electrice se fabrică în două versiuni de bază: cu volum redus, respectiv în baie (cu volum mare) de hexafluorură de sulf.

Intrerupătoarele cu volum redus de gaz (live-tank, Fig.3.15) sunt capsulate în anvelope de porţelan, izolate deasupra nivelului solului, construcţia globală fiind asemănătoare celei întâlnite la întrerupătoarele de putere cu ulei puţin. Gama întrerupătoarelor cu volum redus de hexafluorură de sulf acoperă domeniul nivelurilor de tensiune între limitele 145...800 kV.

Intrerupătoarele cu volum mare de gaz SF_6 (dead-tank, Fig.3.23) au partea activă ermetic închisă într-o cuvă metalică, legată electric la pământ, în care hexafluorura de sulf se găseşte la presiunea de funcţionare. Accesul la căile de curent se face prin izolatoare de trecere, care pot avea înglobate transformatoare de curent. Mai fiabile decât întrerupătoarele cu volum redus de gaz, versiunile realizate în baie de hexafluorură de sulf pot fi convenabil folosite în construcţia celulelor blindate, prin încapsulare în interiorul acestora. Se fabrică uzual pentru tensiuni nominale în domeniul 72...800 kV.

Duratele reduse şi cerinţele modeste de mentenanţă conduc la valori ridicate ale disponibilităţii tehnicii de comutaţie în hexafluorură de sulf şi contribuie la reducerea cheltuielilor totale de exploatare. De exemplu [41], în cazul întrerupătoarelor de exterior tip ELF SP fabricate de ABB, s-a constatat că înlocuirea contactelor nu este necesară decât după deconectarea de 10 ori a unui curent de scurtcircuit de 63 kA; în cazul acestor aparate, potrivit instrucţiunilor de exploatare, efectuarea reviziilor se face nu după durata de funcţionare ci după consumarea rezervei de deconectare, exprimată prin numărul maxim admis de acţionări la un anumit curent de defect, Fig.3.69. Joja de densitate (Fig.3.58) permite supravegherea permanentă a presiunii, inspecţia şi completarea cu gaz SF_6 fiind necesare doar după mai mulţi ani de funcţionare, [41].

In instalaţiile de medie tensiune, utilizarea întrerupătoarelor cu hexafluorură de sulf este foarte diversificată, de la echipamente de comutaţie în instalaţii de distribuţie urbană, comercială, industrială, întrerupătoare pentru generatoare şi până la echipamente

de comutație cu destinație specială (baterii de condensatoare, bobine de reactanță, cuptoare electrice, instalații de la bordul navelor și de pe platformele de foraj marin).

In cele peste trei decenii de fabricare și utilizare a întrerupătoarelor de putere cu hexafluorură de sulf a fost acumulat un volum important de date statistice, în măsură să permită evaluări precise privind comportarea în exploatare a acestora.

Analizele efectuate evidențiază avantajele nete ale comutației de putere în hexafluorură de sulf, comparativ cu tehnologiile tradiționale; acestea sunt concretizate în:

-creșterea valorilor capacității nominale de deconectare la scurtcircuit;

-încadrarea nivelurilor supratensiunilor de comutație între limite normale, prin eliminarea neajunsurilor datorate amorsării repetate a arcului electric și funcționării cu tăiere (smulgere) de curent;

-funcționarea fără consumarea mediului de stingere și eșaparea în atmosferă a particulelor rezultate în urma arderii arcului electric;

-etanșarea pe viață a camerelor de stingere, cu excluderea pierderilor de gaz, a necesității completării mediului de stingere și a influențelor negative exercitate de factorii climatici și de mediu asupra părții active a întrerupătorului;

-eliminarea completă a pericolelor de incendiu și explozie;

-creșterea duratei de funcționare: întrerupătoarele actuale cu comutație în hexafluorură de sulf pot efectua 50 de întreruperi la capacitate nominală de rupere la scurtcircuit, 10.000 - la curent nominal și până la 20.000 de acționări în gol, [6];

-îmbunătățirea consistentă a indicatorilor de fiabilitate: rata medie de defectare calculată pe o durată de 10 ani pentru un lot de 20.000 de întrerupătoare este de numai 0,07‰, [7];

-creșterea periodicității reviziilor la peste 10 ani.

Proprietățile hexafluorurii de sulf, pe drept cuvânt numit "le gaz des appareilleurs" [16], permit realizarea unor echipamente de comutație cu parametri performanți, net superiori celor care caracterizează aparatele tradiționale.

Avantajele utilizării întrerupătoarelor de putere cu comutaţie în hexafluorură de sulf se concretizează în [6], [7], [12], [23], [16], [17], [30], insensibilitate faţă de condiţiile de mediu, dimensiuni de gabarit diminuate, costuri de exploatare reduse, durată de funcţionare electrică şi mecanică ridicată, grad înalt de disponibilitate şi securitate, posibilităţi de control permanent al parametrilor funcţionali.

Inlocuirea echipamentelor de comutaţie tradiţionale cu echipament modern, cu comutaţie în hexafluorură de sulf, este în plină desfăşurare. Astfel, după datele din literatură [32], [49], ponderea întrerupătoarelor cu ulei puţin în instalaţiile de medie tensiune era în 1991 de mai puţin de un sfert, celelalte trei fiind ocupate de întrerupătoarele cu comutaţie în hexafluorură de sulf (46%), respectiv în vid (31,2%).

Bibliografie

1. Baraboi A., Adam M., Intrerupătoare de putere cu comutaţie în hexafluorură de sulf. Energetica, seria B, 5, 219 (1992).
2. Baraboi A., Echipamente electrice. Inst. Polit. Iaşi, 1989.
3. Barrault M., Bernard G., Chevrier P., Maftoul J., Rowe S., Scarpa P., Filleau O., Kersuzan J. P., Les disjoncteurs à autoexpansion sont le fruit d'études approfondies. RGE, 11, 72 (1992).
4. Boehle B., Guthmann O., Haneke K., Hügin K. H., Tettenborn W., Voß G., Wittwer H., Schaltanlagen. Cornelsen Verlag Schwann-Girardet, Düsseldorf, 1987.
5. Braun D., Guerig A., Life Management for Generator Circuit-Breakers. Report 13-204, CIGRE (1994).
6. Braun D., Hellman W., Plessl A.., Application criteria for SF_6 and vacuum circuit-breakers. ABB Review, 4 (1989).
7. Ciboldi P., Perdoncin F., Talpo G., Le domaine d'emploi des disjoncteurs moyenne tension à SF_6. Journée SF_6, AIM Liège (1988).

8. Ciok Z., Jankowicz S., Poniecki W., Modelling and Investigation of Interaction between Arc Energy and Operating Mechanism of GCB. Report 13-106, CIGRE (1994).
9. Ciunihin A. A., Elektriceskie apparatî. Energhiia, Moskva, 1975.
10. Egorov V. G., Rodina S. A., Seryakov K. I., Modelling of SF_6 Puffer Interrupters. Report 13-105, CIGRE (1994).
11. Flurscheim C. H., Teoriia i konstrukţii vîkliuciatelei. Energoizdat, Leningrad, 1982 (trad. din lb. engleză).
12. Hennbert J., Essais et développement des disjoncteurs SF_6 moyenne tension. Journée SF_6, AIM Liège, (1988).
13. Hofbauer W., Stechbarth J., Strategic Tools-Application for the Development of a 300 kV/50 kA GIS Self-Blast Circuit Breaker. Report 13-110, CIGRE (1994).
14. Hortopan Gh., Aparate electrice, EDP Bucureşti, 1981.
15. Jouclar Ph., Postes sous enveloppe métallique (PSEM). Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
16. Legro's V., Les disjoncteurs à SF_6: leur évolution. Journée SF_6, AIM Liège (1988).
17. Messié M., Les postes haute tension sous enveloppe métallique: bilan et perspectives d'évolution. RGE, 1, 1 (1993).
18. Mosch W., Hauschild W., Izolaţii de înaltă tensiune în hexafluorură de sulf. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1984 (trad. din lb.germană).
19. Pelenc Y., Appareillage électrique d'interruption à haute tension. Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
20. Plessl A., Niemeyer L., Perdoncin F., Research for medium-voltage SF_6 circuit-breakers. ABB Review, 2 (1989).
21. Plessl A., Poole D., A new Self SF_6 Extinguishing MV Distribution Circuit-Breakers. Brown Boveri, 3 (1987).
22. Poltev A. I., Konstrukţii i rasciot elegazovîh apparatov vîsokogonapriajeniia. Energhiia, Leningrad, 1979.
23. Ryan H. M., Jones G. R., SF_6 Switchgear. Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.

24. Thuries E., Dufournet D., Conception et évolution des disjoncteurs haute et moyenne tension. RGE, 11, 63 (1992).
25. Toda H., Ozaki Y., Miwa I., Nishiwaki S., Murayama Y., Yanabu S., Development of 800 kV Gas-Insulated Switchgear. IEEE Trans. on Power Delivery, 7, 1, 316 (1992).
26. Tomoshiro Marutani, Onuma Akiyoshi, Gas - insulated switchgear. Mitsubishi Elec. Adv., 39 (1987).
27. Umlauft D., Siemens Schalttechnik. OZE, 40, 12 (1987).
28. Van der Sluis L., Damstra G. C., Rutgers W. R., Schoonenberg G. C., The Modelling of Circuit-Breaker Arcs, Application in Design and Testing of Switchgear. Report 13-111, CIGRE (1994).
29. * * * L'arc électrique et ses applications. Ed. CNRS, Paris, 1984.
30. * * * Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers. Ed. by Kunio Nakanishi, MarcelDekker Inc. New York-Basel-Hong Kong, 1991.
31. * * * Intrerupătoare cu SF_6 tip H 14 P 40, Electroputere Craiova, România.
32.* * * Distribution HTA. Appareillage "SF6". Disjoncteurs Fluarc 1 à 38 kV, contacteurs Rollarc 1 a 12 kV. Catalogue Merlin Gerin AC0372 (1993).
33. * * * Distribution MT. Ensembles préfabriqués debrochables. Postes de distribution MT 1 à 40kV: la gamme Fluair. Catalogue Merlin Gerin AC0282 (1992).
34. * * * L'appareillage moyennne tension à SF6. Monographies techniques. EDF International (1987).
35. * * * SM6 l'experience du futur. Catalogue Merlin Gerin AC0275 (1992).
36.* * * Type tested metal-enclosed SF_6 compact switchgear cubicle system up to 24 kV type RGC. Catalogue ABB NH 5194 GB (1993).
37. * * * SF_6 Circuit-Breaker HPL-A. Catalogue ABB Publ. SESWG/B 2312 E (1990).

38. * * * SF_6 Circuit-Breaker HPL-B. Catalogue ABB Publ. SESWG/B 2313 E (1990).
39.* * * Outdoor SF_6 Circuit-Breaker type EDF with single-chamber interruption per pole. Information leaflet EDF-AHMA/05/2/02. Catalogue ZWAR, Poland.
40. * * * SF_6 - gasisolierte Schaltanlagen Typ ELK - 0. ABB Calor Emag Schaltanlagen AG, DEACE 1036 94 D (1994).
41. * * * Disjoncteurs à SF_6 type ELF SP pour l'extérieur. ABB Schaltanlagen GmbH, DESAN 1057 90 F (1990)
42. * * * HV Switchgear. ABB, CH HOS 1002 92 E (1992).
43. * * * A Historical Review of ABB High-Current Systems. ABB Schaltanlagen GmbH, DESAN 1023 93 F (1993).
44.* * * Intreruptoare independente cu SF_6 tip H 72,5-170 kV-2500 A-40(31,5) kA. SC Electroputere SA România.
45. * * * Intreruptoare independente cu SF_6 tip H pentru 420 kV-2500 A-40 kA. SC Electroputere SA România.
46. * * * Contactor de curent alternativ cu SF_6 tip HEXA CONT. SC Electroputere SA România.
47. * * * Intreruptor de medie tensiune de interior cu SF_6 tip HF 12/24 kV. SC Electroputere SA România.
48. * * * Spring operating mechanism BLG. Catalogue ABB Publ. SESWG/B 2501 E (1990).
49. * * * Le SF_6 technologie universelle en moyenne tension. Catalogue Merlin Gerin VP0371 (1991).

Capitolul 4

COMUTATIA DE PUTERE IN VID AVANSAT

Utilizarea vidului avansat ($10^{-7}...10^{-2}$ Pa) ca mediu electroizolant şi de stingere a arcului electric în comutaţia de putere a fost prefigurată încă din anii 1920 dar, ca şi în cazul hexafluorurii de sulf, a fost necesară trecerea câtorva decenii până când, abia în 1950, primele întrerupătoare să poată fi comercializate [12], [23], [24]. Iniţial evoluţia acestei tehnici de comutaţie a fost destul de lentă, probabil şi din cauza principiilor total noi pe care se bazează. In prezent, întrerupătoarele cu comutaţie în vid avansat cunosc generalizarea în reţelele de distribuţie de medie tensiune.

4.1. Amorsarea şi stingerea arcului electric în vid

Curbele lui Paschen (Fig.1.2), stabilind interdependenţa dintre tensiunea de străpungere u_s a unui spaţiu disruptiv şi produsul (pd) evidenţiază existenţa unui minim, specific tranziţiei de la mecanismele fenomenului de străpungere într-un gaz oarecare, la cele care caracterizează producerea lui în vid. Proprietăţile electroizolante ale unui gaz depind de comportarea particulelor acestuia la impactul cu electroni acceleraţi în câmp electric, tensiunea de străpungere scăzând pe măsura creşterii parcursului mediu al electronilor. Dacă parcursul mediu atinge şi depăşeşte dimensiunile spaţiului gazos de referinţă, tensiunea de străpungere creşte din nou pentru ca, în final, să devină practic independentă

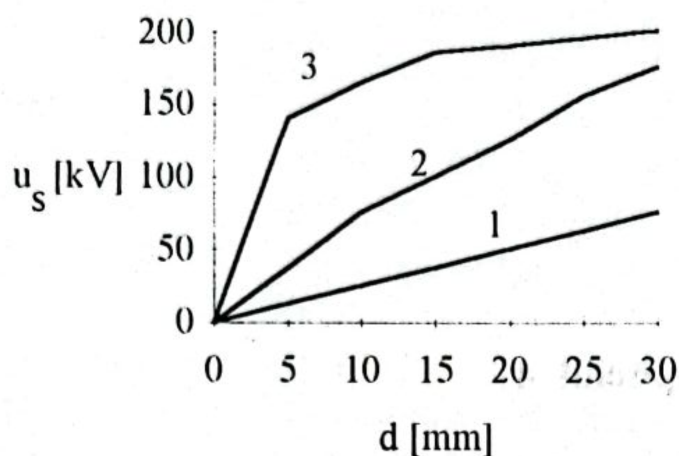


Fig.4.1
Tensiunea de străpungere

de valorile presiunii de lucru ($10^{-4}...10^{-3}$ Pa).

Acesta este pragul corespunzător amorsării descărcării electrice într-un spaţiu vidat, în care particulele încărcate cu sarcini electrice provin din metalul pieselor de contact.

În Fig.4.1 sunt prezentate curbele tensiunii de străpungere u_s, în raport cu distanţa d, considerată între două contacte amplasate în aer (curba 1) şi hexafluorură de sulf (curba 2), ambele gaze considerate la presiune normală, respectiv într-un spaţiu vidat (curba 3), [13]. Sunt astfel evidenţiate proprietăţile electroizolante ale vidului avansat, caracterizat prin tensiuni de străpungere de valori mari, ceea ce conduce la obţinerea unor distanţe de izolaţie mult mai mici decât în alte medii electroizolante. Din aceste motive, la aceeaşi tensiune nominală, dimensiunile de gabarit ale echipamentelor cu stingerea arcului electric în vid rezultă mai mici decât cele întîlnite la echipamente funcţionând cu alte medii de stingere (ulei, aer, SF_6).

In raport cu distanţa d dintre contacte, tensiunea de străpungere u_s poate fi exprimată printr-o relaţie de forma:

$$u_s = K\sqrt{d}, \qquad (4.1)$$

K fiind o constantă.

Astfel, tensiunea de străpungere la impuls de 1,2/50 μs între doi electrozi din Cu-Cr, amplasaţi în vid avansat la distanţa de 12 mm este de circa 150 kV, [12].

Dependenţa neliniară de forma (4.1) pune în evidenţă neajunsul major al vidului ca mediu electroizolant şi explică dificultăţile de extindere a acestei tehnici de comutaţie la niveluri superioare de tensiune (de exemplu, pentru o dublare a tensiunii de

străpungere este necesară creşterea de patru ori a distanţei de izolaţie).

Remarcabila rigiditate dielectrică a vidului avansat nu este datorată comportării corespunzătoare a moleculelor de gaz la impactul cu electroni acceleraţi în câmp magnetic ci, dimpotrivă, faptului că astfel de coliziuni nu au loc. In vidul complet nu există posibilitatea declanşării unui mecanism de avalanşă electronică, în măsură să conducă la străpungerea dielectrică.

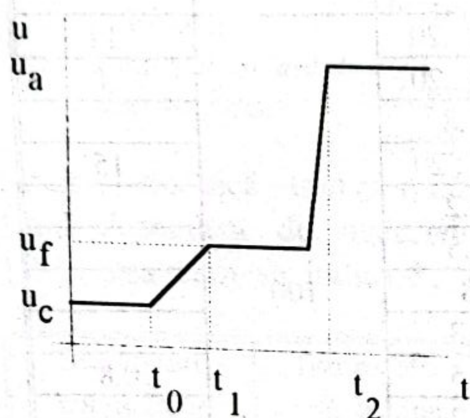


Fig.4.2
Tensiunea la amorsarea arcului electric în vid avansat

Amorsarea unui arc electric de mare putere în vid avansat antrenează vaporizarea la suprafaţă a pieselor de contact şi electrozilor, fapt care conduce la dezvoltarea rapidă, în zona de ardere, a unei presiuni dinamice cu valori apropiate de cea atmosferică. In regim normal de funcţionare (Fig.4.2) căderea de tensiune pe contacte u_c corespunde rezistenţei de contact. La deconectare, pe măsura scăderii forţei de apăsare, cresc rezistenţa de contact, temperatura pe suprafaţa acestora şi căderea de tensiune pînă când, în momentul t_1, se atinge valoarea u_f corespunzătoare topirii metalului. Această tensiune rămâne constantă până în t_2, când puntea de metal topit dintre contacte dispare exploziv, prin vaporizare. Intre contacte se formează, iniţial din atomi metalici în stare ionizată, un mediu cu foarte bune proprietăţi conductoare, prin care curentul continuă să circule.

Modul de amorsare şi proprietăţile arcului electric iniţial sunt deci asemănătoare celor din alte tehnici de comutaţie: un spot catodic unic având temperatura de vaporizare, emite din abundenţă vapori metalici care se constituie într-o coloană foarte concentrată şi conductoare.

Arcul electric amorsat în vid la separarea pieselor de contact este deci o plasmă de vapori proveniţi din metalul contactelor, caracterizată printr-o mare viteză de difuzie.

Câteva caracteristici ale arcului electric cu ardere în vid avansat [19], sunt date în Tab.4.1.

Tab.4.1

Materialul contactelor	Temperatura de evaporare [^{o}C]	Conductivitatea termică la 18 ^{o}C, [W/m^{o}K]	Tensiunea de arc, [V]	Curentul de arc, [A]	Curentul minim de arc, [A]
Ag	1950	407	16,5...20		12
Al	2057	211	16,5...20		4
Cd	767	93	10,8		
Cu	2336	384	19,2...20		15
Mg	1107	157	14,2		
Mo	4800	145	25,5		
Ni	2900	59	18	100	
Pb	1620	34,7	10,3		
Sb	1380	17,5	10,5		0,8
Ta	≅4100	54,3	14...24		10
W	5900	146	22		40
Zn	907	111	12		
Zr	>2900	15,6	21,5		

În vid arcul electric poate exista sub formă difuză (când este traversat de curenţi cu intensitatea mai mică de 3...5 kA), respectiv concentrată, în cazul curenţilor cu intensităţi de valori mari, [7]. Curentul limită la care arcul electric trece dintr-o formă în alta depinde de dimensiunile, forma şi materialul din care sunt confecţionate contactele şi electrozii acestora precum şi de viteza de variaţie a intensităţii curentului.

Arcul electric difuz este constituit din numeroase coloane arzând în paralel, fiecare provenind din câte un spot catodic existent pe electrodul negativ. Din acestea se desprind spre anod canale de plasmă, parcurse de curenţi cu intensitatea de 20...100 A şi densităţi de curent de cel puţin 10^{12} A/m^{2}, [2]. Spoturile catodice se deplasează continuu pe suprafaţa electrozilor (cu viteze ce ajung la 10 m/s) şi se resping reciproc, în timp ce forţele Lorentz dintre coloanele de arc exercită tendinţa de a le apropia.

La curenţi de mică intensitate, o influenţă mai mare o are

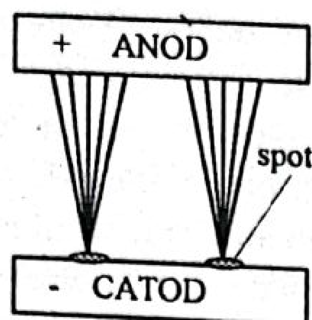


Fig.4.3
Spotul catodic și arcul electric difuz

efectul de respingere între spoturi. Electronii traversează distanța dintre contacte cu viteze de ordinul 10^6 m/s, formând coloane de arc difuz conice (Fig.4.3), având în vecinătatea axei temperaturi mai mari de 3000 ^{o}K. Arderea arcului electric presupune existența unui curent minim de menținere, dependent de materialul contactelor.

Pe durata de ardere a arcului electric difuz, gradul de electroeroziune a contactelor (pierderea de masă raportată la sarcina electrică transportată) se consideră aproximativ constant, fiind dependent de materialul contactelor și de forma curentului [19], așa cum se indică în Tab.4.2.

Tab. 4.2

Materialul contactelor	Temperatura de topire, [^{o}C]	Gradul de electroeroziune, [μg/C]		
		Curent continuu	Impuls 250 μs	Impuls 10...100 ns
Sn	227		295	
Cd	320	655		
Pb	330		510	
Zn	420	215		
Mg	650		31	
Al	660		28	100
Ag	960	150		50
Cu	1083	115	35	
Ni	1457	100	47	
Fe	1538	73	48	
Ti	1730	52	30	
Zr	1852		53	
Cr	1897	40	20	
Mo	2605	47	36	
Gd	2830		55	
Co	2910		44	
Ta	2980		56	
W	3380	62	55	136
Y	3660		45	
C	-	17		

Când intensitatea curentului prin arcul difuz se mărește, numărul spoturilor catodice și al coloanelor de arc crește, se mărește și tensiunea de arc (ajungând la circa 40 V pentru un curent cu intensitatea de 7 kA) și, mărind în continuare intensitatea curentului, tensiunea crește brusc până la valori de ordinul 100...200 V. În acest stadiu apar spoturi anodice, arcul electric devenind de tip concentrat.

La curenți mai mari de 10 kA, atât spoturile anodice cât și cele catodice ajung de dimensiuni mari și își reduc mobilitatea, evoluția ulterioară a descărcării depinzând de condițiile termice de la contacte. Evitarea topirii locale a pieselor de contact este posibilă prin deplasarea extremităților arcului pe toată suprafața acestora și pe electrozi. Utilizarea unor câmpuri magnetice radiale pune coloana arcului electric în mișcare de rotație în timp ce, prin câmpuri magnetice axiale, extremitățile arcului se extind la suprafețe mărite pe contacte și electrozi. In ambele cazuri se obțin micșorarea și unifomizarea electroeroziunii suprafețelor de contact. In Fig.4.4 se prezintă influența unui câmp magnetic axial asupra modului de ardere a arcului electric în vid avansat, [12].

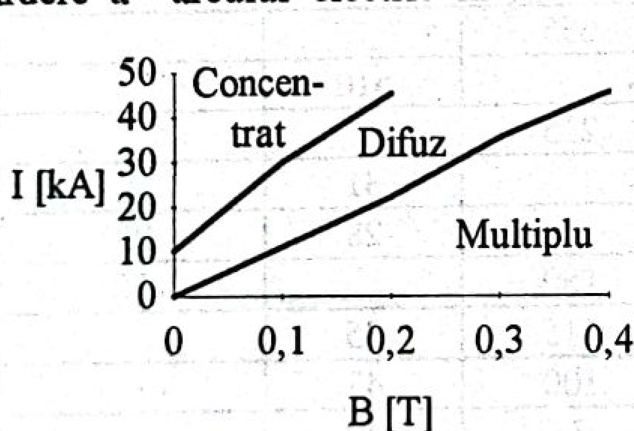


Fig.4.4

Moduri de ardere a arcului electric în vid

Stingerea arcului electric depinde de densitatea locală a vaporilor de metal din intervalul dintre contacte și din jurul acestora. Viteza de difuzie a plasmei crește rapid pe măsură ce intensitatea curentului scade și se apropie de trecerea prin zero, fiind create condițiile necesare condensării vaporilor de metal și refacerii vidului în camera de stingere, în urma cărora se obține întreruperea definitivă a curentului. Circa 90% [1], [2], din vaporii metalici în care se amorsează arcul electric se depun prin condensare pe suprafețele de contact din care provin. În acest fel metalul pieselor de contact este recuperat aproape integral, intensitatea electroeroziunii fiind limitată la valori foarte mici. Pe această cale se obține creșterea substanțială

a duratei de funcţionare a contactelor. Condensarea vaporilor metalici în care se amorsează arcul electric de deconectare este stimulată prin amplasarea în vecinătatea contactelor a unor ecrane metalice spre care plasma difuzează.

Inerţia termică a arcului electric, exprimată prin constanta sa de timp, este extrem de mică. De altfel, deoarece răcirea coloanei arcului nu mai joacă nici un rol în acest caz, constanta de timp îşi pierde practic semnificaţia precizată în § 2.2.1.

La trecerea prin zero a intensităţii curentului, refacerea rigidităţii dielectrice a spaţiului dintre contacte este cu atât mai rapidă cu cât presiunea reziduală a vaporilor metalici care formează plasma este mai scăzută, adică arcul electric arde în starea difuză. Trecerea rapidă de la arcul concentrat la cel difuz se obţine prin alegerea judicioasă a materialelor şi prin construcţia adecvată a sistemului de contacte.

4.2. Caracteristici constructive şi funcţionale ale echipamentelor cu comutaţie în vid

Tehnica vidului avansat nu permite intervenţia asupra procesului de comutaţie decât printr-un număr extrem de redus de parametri; spre deosebire de toate celelalte tehnici, în acest caz nu se poate acţiona asupra naturii sau presiunii mediului de stingere, vitezei suflajului, diametrului ajutajelor sau alungirii coloanei arcului electric etc. Mai mult, probleme tehnologice foarte dificile, cum este cea a realizării unor lipituri perfect etanşe şi stabile între un metal şi un material ceramic sau obţinerea unor metale cu un grad extrem de ridicat de puritate, fac din comutaţia în vid avansat una din cele mai pretenţioase tehnici sub raportul obţinerii de parametri performanţi. Contrar unor previziuni sceptice, rezultatele nu au întârziat să apară şi, în prezent, tehnica vidului avansat reprezintă un concurent redutabil pentru aparatele cu comutaţie în hexafluorură de sulf în domeniul instalaţiilor de medie tensiune.

Câteva tipuri de camere de stingere prezentate în Fig.4.5 [7], evidenţiază posibilităţile de amplasare în capsula vidată a principalelor elemente constructive: sistemul de contacte, burduful

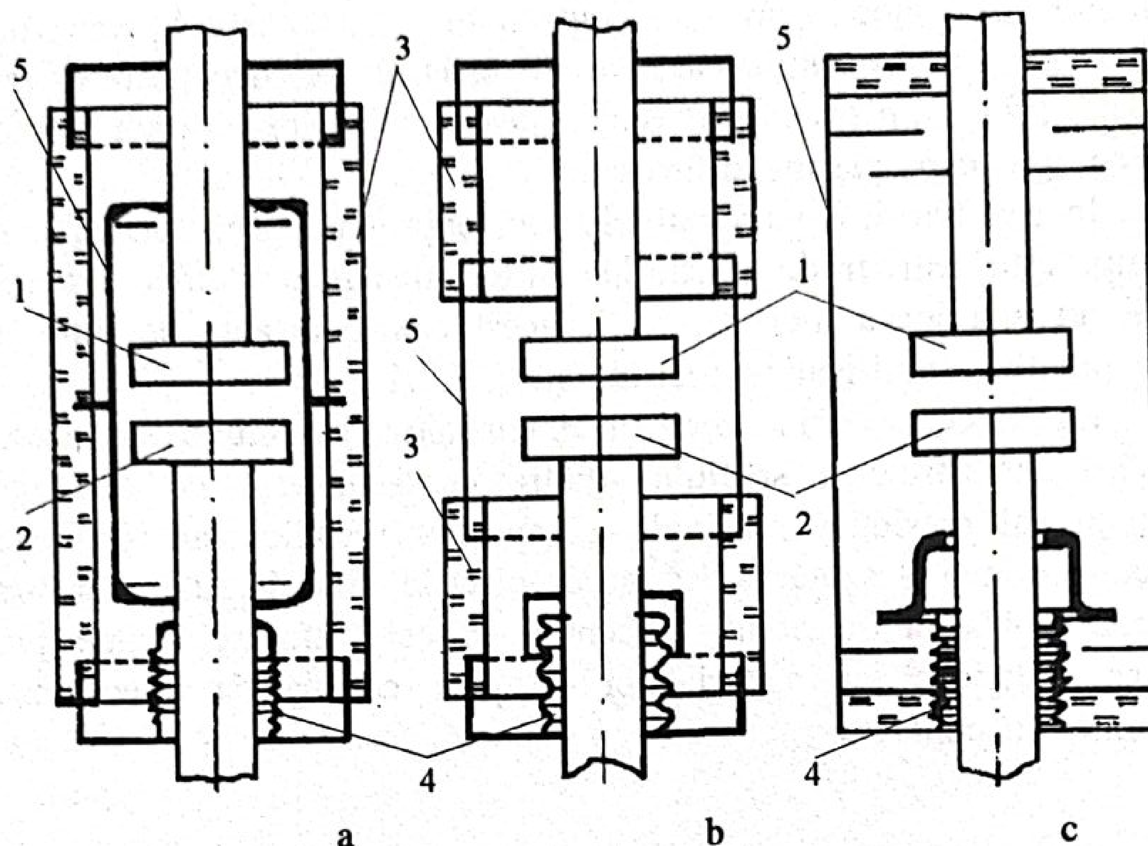


Fig.4.5

Camere de stingere vidate: a-cu capsulă de sticlă; b-cu ecran exterior; c-cu capsulă metalică; 1-contact fix; 2-contact mobil; 3-capsulă de sticlă; 4-burduf metalic; 5-ecran.

de etanșare și ecranele metalice cu rol de suport pentru condensarea vaporilor care alcătuiesc plasma. În varianta din Fig.4.5a, ecranul de condensare 5 este amplasat în interiorul incintei de sticlă 3; la construcțiile din Fig.4.5b,c ecranul de condensare întregește incinta vidată a camerei de stingere.

Durata de funcționare a unei camere de stingere vidate depinde în foarte mare măsură de soluția constructivă adoptată, de realizarea unui înalt grad de etanșare, de natura materialelor contactelor. Presiunea inițială în camera de stingere este de circa 10^{-7} Pa. Creșterea presiunii pe durata exploatării (Fig.4.6) se datorează atât neetanșeităților de fabricație cât și difuziei normale a aerului prin pereți; pentru o durată de funcționare de circa 20 ani, realizată de camerele de stingere actuale, este necesar ca pierderea specifică de presiune să fie mai mică de 10^{-11} Pa.ℓ/s, [2].

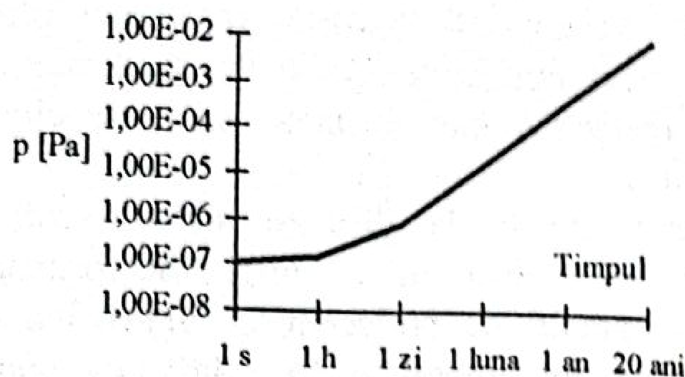


Fig.4.6
Creșterea presiunii în capsula vidată

Camera de stingere devine inutilizabilă la depășirea presiunii de 10^{-2} Pa, deoarece, în acest caz, lungimea drumului liber al particulelor de gaz ajunge la dimensiunile camerei de stingere și se poate amorsa fenomenul de ionizare prin șoc.

În construcția contactelor și electrozilor întrerupătoarelor cu stingerea arcului electric în vid se au în vedere următoarele aspecte tehnice:

-realizarea nivelului nominal de izolație între contactele deschise;

-asigurarea unui înalt grad de puritate pentru materialele de contact;

-dozarea corespunzătoare a cantității de vapori metalici produși la deconectare;

-adoptarea formei și dimensiunilor optime pentru piesele de contact și electrozi;

-stabilizarea prin câmpuri magnetice a arcului electric de deconectare în faza finală de ardere a acestuia.

Dacă incinta vidată poate determina, prin pierderea vidului, micșorarea duratei de funcționare a unui întrerupător, sistemul de contacte și electrozi influențează direct valorile multor parametri funcționali, dintre care se menționează: capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit, mărimea supratensiunilor de comutație, durata de funcționare, prețul și însăși menținerea îndelungată a vidului în camera de stingere. Din aceste motive, una din direcțiile de efort în cercetarea consacrată dezvoltării echipamentelor de comutație în vid este îndreptată spre stabilirea formei și dimensiunilor constructive optime ale sistemului de contacte, și realizarea materialelor cu cele mai bune proprietăți pentru construirea pieselor de contact și a electrozilor.

Durata mare de funcționare a întrerupătoarelor cu vid impune recuperarea aproape integrală, la deconectare, a vaporilor

metalici proveniţi din piesele de contact. Aceasta se obţine prin condensarea vaporilor chiar pe suprafeţele pieselor de contact, depunerea fiind stimulată de realizarea unei distanţe mici, de circa 10 mm, între contactele deschise.

Între piesele de contact situate la distanţe atât de mici, intensitatea câmpului electric are valori foarte mari (de ordinul 200...300 kV/cm), încât forma, gradul de prelucrare şi dimensiunile suprafeţelor de contact joacă un rol important în asigurarea unor valori mari pentru tensiunea de străpungere. Deoarece străpungerea în acest caz are loc prin emisie electronică la catod, micile asperităţi sau neuniformităţi ale suprafeţelor de contact pot conduce la iniţierea străpungerii în câmp electric.

Tinând seama de procesele repetate de vaporizare şi condensare, este necesar ca materialul contactelor să aibă un înalt grad de puritate şi să fie extrem de lipsit de gaze; în acest fel este posibilă redepunerea uniformă a materialului vaporizat pe suprafeţele de contact şi, în acelaşi timp, menţinerea vidului în camera de stingere.

Un alt aspect tehnic, determinant în alegerea materialelor pentru contactele care funcţionează în vid, este legat de tendinţa de sudare a pieselor de contact, atunci când contactul este închis. Deoarece piesele de contact nu sunt separate între ele nici măcar prin straturi străine monomoleculare, tendinţa de sudare se manifestă vizibil chiar la temperatură normală şi sub acţiunea unor forţe de apăsare având valori relativ mici. Ruperea la deschidere a punţilor metalice rezultate prin sudare se soldează cu asperităţi pe suprafeţele de contact, fapt care conduce la micşorarea tensiunii de străpungere între contactele deschise.

Materialele pentru contactele întrerupătoarelor cu comutaţie în vid trebuie să satisfacă de asemenea cerinţe privind conductivitatea termică şi presiunea de vapori, astfel încât să fie posibilă dozarea optimă a cantităţii de vapori dezvoltate la deconectare. Datorită vitezei mari de difuzie a plasmei în vid, arcul electric este instabil şi poate fi stins înainte de momentul anulării naturale a intensităţii curentului, existând tendinţa de funcţionare cu tăiere (smulgere) de curent; aceasta, la rândul ei, conduce la apariţia unor supratensiuni de comutaţie având valori mari. In

Fig.4.7 este reprezentat curentul prin întrerupător în ipoteza stingerii arcului electric în momentul t_0, la valoarea $i_t \neq 0$ a curentului tăiat.

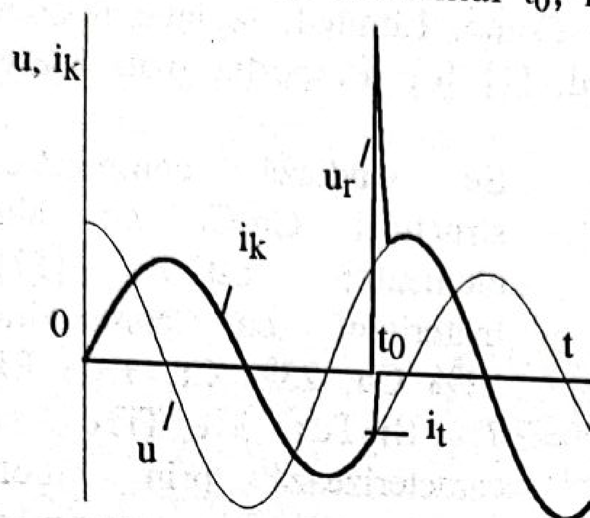


Fig.4.7
Deconectarea cu tăiere de curent

Energia magnetică înmagazinată în inductanţele circuitului de sarcină este convertită în energie electrostatică, la bornele întrerupătorului înregistrându-se supratensiuni de comutaţie care pot fi de valori mari; acestea se estimează cu ajutorul relaţiei:

$$u_m = i_t \sqrt{\frac{L}{C}}, \qquad (4.2)$$

u_m fiind supratensiunea iar L, C - parametrii echivalenţi ai reţelei deconectate.

Din acest motiv, intensitatea curentului tăiat trebuie să aibă valori cît mai mici care, constituind un criteriu de calitate pentru întrerupătoarele cu comutaţie în vid, se obţin şi prin creşterea cantităţii de vapori produşi la deconectare.

Astfel [12], dacă la primele întrerupătoare cu comutaţie în vid, prevăzute cu contacte din cupru, intensitatea curentului tăiat avea valori de 20...40 A, prin utilizarea unor materiale sinterizate de tipul Cu-Bi şi, mai curând Cu-Cr, aceste niveluri au fost scăzute la circa 8 A, respectiv sub 3 A..

Dozarea optimă are în vedere asigurarea arderii stabile a arcului electric până la valori ale intensităţii curentului foarte apropiate de zero şi, în acelaşi timp, realizarea unei durate de viaţă cât mai mari pentru contacte, prin limitarea electroeroziunii acestora.

Materialele cercetate şi utilizate pentru construcţia contactelor şi a electrozilor sunt aliaje sau compoziţii sinterizate pe bază de cupru, căruia i se adaugă anumite cantităţi de wolfram, molibden sau crom.

Influenţe favorabile privind micşorarea efectului de tăiere a curentului la deconectare se obţin prin adăugarea de stibiu şi zinc.

În construcţia multor întrerupătoare actuale cu comutaţie în vid a fost unanim adoptat drept material de contact sinterizatul Cu-Cr, creat iniţial de English Electric Comp. Limited, la laboratoarele pentru cercetare Nelson din Stafford, [1], [6]. Proporţia uzuală este de 60% cupru şi restul crom.

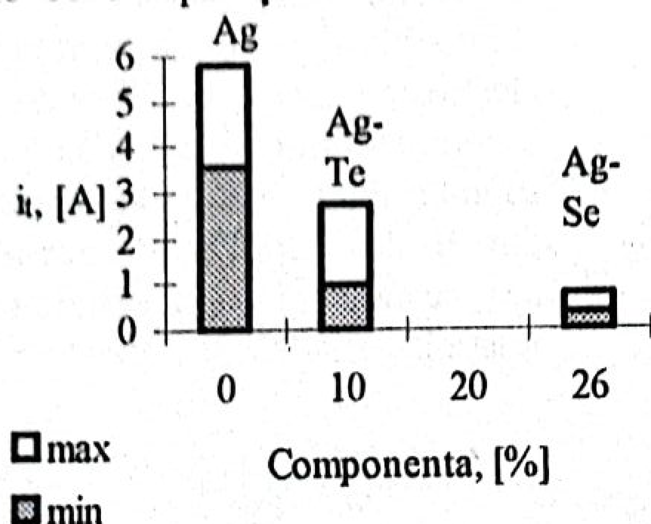


Fig.4.8
Influenţa materialului de contact asupra curentului tăiat

Se studiază completarea structurii Cu-Cr cu alte elemente; astfel [17], materialul cu compoziţia 52% Cu, 25% Cr, 13% Bi, 7% Bi_2Te_3, 3% TiTe se caracterizează prin valori foarte mici ale curentului tăiat şi viteză ridicată de creştere a rigidităţii dielectrice în camera de stingere, cantitatea de vapori produsă la deconectare fiind substanţial diminuată.

Cromul are faţă de wolfram avantajele unei temperaturi de vaporizare mai scăzute, astfel încât probabilitatea de producere a termoemisiei electronice după condensarea metalului este mai mică; arcul electric se stinge definitiv în zona primei treceri prin zero a intensităţii curentului.

Utilizarea cromului este de asemenea preferată datorită efectului înalt de getter (degazor) pe care acesta îl exercită.

Urmărindu-se obţinerea unor efecte similare, în laboratoare din SUA şi Japonia se experimentează comportarea contactelor construite din materiale pe bază de argint.

In Fig.4.8 se prezintă influenţa compoziţiei utilizate asupra intensităţii curentului tăiat, [24].

Forma constructivă a contactelor şi geometria electrozilor răspund cerinţelor privind asigurarea unei uzuri uniform distribuite pe suprafaţa acestora.

O evoluţie a tipurilor de contact care echipează întrerupătoarele cu comutaţie în vid este prezentată în Fig.4.9. De la contactele cu electrozi sub formă de petală spiralată, Fig.4.9a, s-a

trecut la construcția și utilizarea contactelor de tip contrate (Fig.4.9b,c).

Acestea au formă de cupă cu crestături înclinate pe pereții laterali pentru a produce, prin suflaj magnetic, rotirea arcului electric pe suprafața circulară de contact.

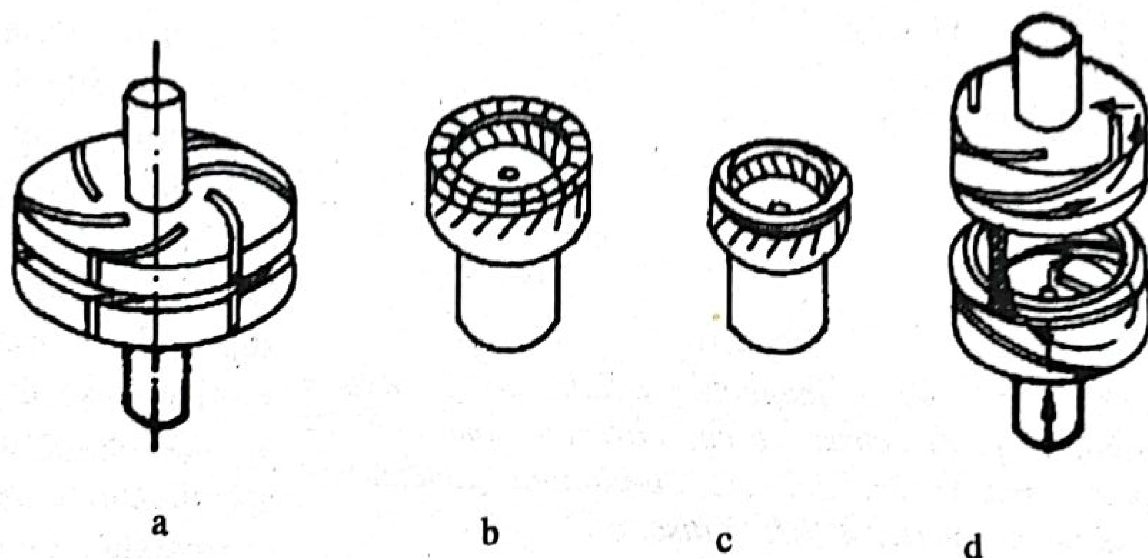


Fig.4.9
Tipuri constructive de contacte: a-petală spiralată; b, c-contrate; d-folded petal.

Perfecționarea contactelor de tip contrate a permis reducerea diametrului cupei de la 100 mm la 80 mm, simultan cu creșterea capacității nominale de rupere la scurtcircuit de la 31,5 kA la 40 kA, [6], pentru întrerupătoarele din clasa 36 kV.

Combinând cele mai bune efecte ale geometriilor din Fig.4.9a,b,c, s-a realizat contactul de tip folded petal, fig.4.9d; acesta, cu un diametru de numai 35 mm, permite întreruperea unor curenți cu intensitatea de 20 kA, [1].

Contactele prezentate în Fig.4.9 sunt din categoria celor cu câmp magnetic orientat transversal în raport cu coloana arcului electric. Aceste contacte nu pot întrerupe curenți mai mari de 40 kA, chiar dacă diametrul pieselor de contact ajunge la valori de 100...150 mm. La aceleași dimensiuni este posibilă aproape dublarea curentului întrerupt, dacă în zona de contact se creează un câmp magnetic axial [1], [2], [24].

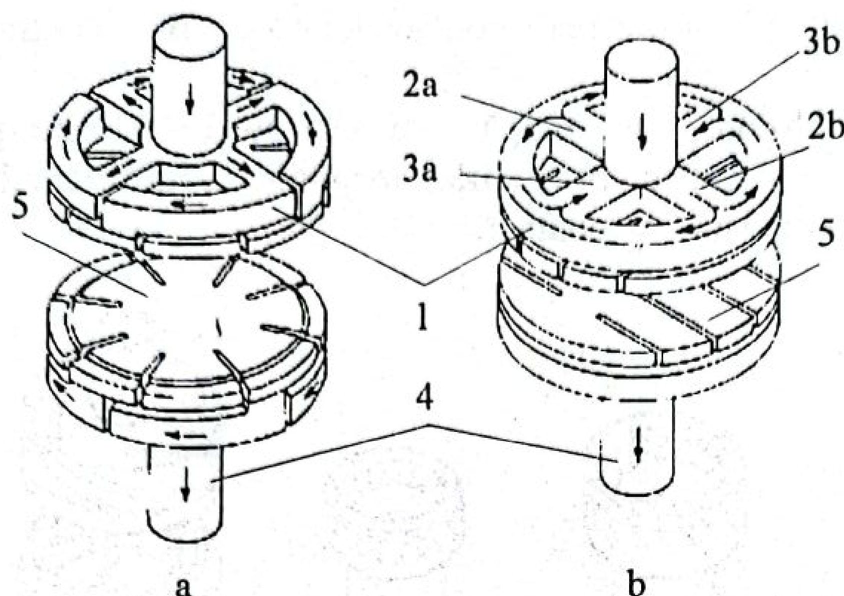


Fig.4.10
Contacte cu câmp magnetic axial: a-cu circuite întrerupte pe electrod; b-cu circuite continue; 1-suport circular; 2a, 2b, 3a, 3b-circuite generatoare de câmp magnetic; 4-tijă; 5-disc.

Construcţia unor contacte care funcţionează cu câmp magnetic axial [10], [24], este prezentată în Fig.4.10.

Conform variantei date în Fig.4.10a contactul, având circuite întrerupte pe toţi electrozii, este constituit din suportul circular 1, tija 4 şi discul 5. O construcţie asemănătoare este prezentată în Fig.4.10b, unde circuitele electrozilor, generatoare de câmp magnetic, sunt continue. Datorită circulaţiei curentului pe traseele 2a, 2b, 3a, 3b în zona de ardere a arcului electric se produce un câmp magnetic axial multipolar. Sub acţiunea acestuia arcul ocupă practic uniform spaţiul dintre contacte, fiind împiedicată difuzia plasmei reziduale care afectează procesul de refacere a rigidităţii dielectrice în camera de stingere.

In capsule vidate echipate cu contacte funcţionând cu câmp magnetic axial şi în condiţii de laborator s-au întrerupt curenţi având intensitatea de circa 200 kA, [24]. Teste de maximă severitate au permis întreruperea unor curenţi de 48 kA la tensiunea de 63 kV, respectiv de 72 kA la tensiunea de 6,3 kV, [10].

In Fig.4.11 se prezintă comparativ dependenţa capacităţii nominale de deconectare la scurtcircuit în raport cu diametrul electrodului la contacte cu câmp magnetic radial, respectiv axial [24].

Creşterea performanţelor sistemului de contacte şi electrozi a permis reducerea simţitoare a dimensiunilor de gabarit ale camerelor de stingere vidate, [2].

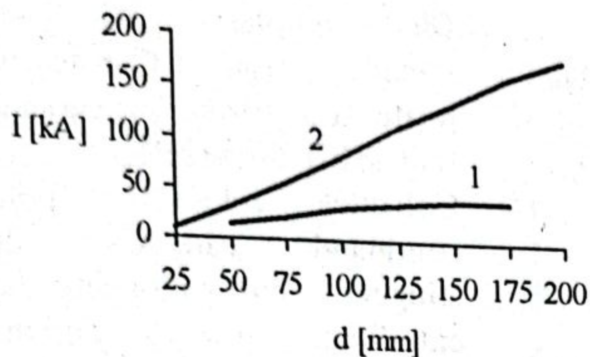


Fig.4.11

Capacitatea de deconectare în funcție de diametrul pieselor de contact: 1-câmp magnetic radial; 2- câmp magnetic axial.

Indicatorii de fiabilitate ai întrerupătoarelor de orice tip sunt puternic afectați de nefuncționarea sistemului mecanic și a mecanismului de acționare care le echipează; circa 80% din toate refuzurile și defectele întrerupătoarelor sunt de natură mecanică, [3].

Mecanismele de acționare care echipează întrerupătoarele cu comutație în vid trebuie să se caracterizeze prin durate mari de funcționare fără revizii și reparații, anduranța mecanică necesară fiind de câteva zeci de mii de acționări, compatibilă cu indicatorii de fiabilitate ai părții active (cameră de stingere, sistem de contacte). Cerințele impuse mecanismelor de acționare ale întrerupătoarelor cu comutație în vid sunt îndeplinite în condiții bune de variantele cu acumulare de energie în resorturi, ușor de adaptat pentru deplasarea pe distanțe mici a contactelor mobile. Energia necesară pentru acționare, acumulată în resorturi, are valori de 50...150 J. Variantele construite realizează în mod obișnuit, în condiții precizate privind anduranța mecanică, un număr de $(2...3)10^4$ acționări [3], [4], [11], [12], [22].

4.3. Variante constructive

Principiile constructive care au condus la realizarea întrerupătoarelor cu comutație în vid avansat sunt tipice pentru aparatajul de comutație destinat instalațiilor de medie tensiune. Arhitectura unui întrerupător cu vid din clasa 12 kV/1250 A/31,5 kA [22], cu precizarea principalelor dimensiuni de gabarit, este prezentată în Fig.4.12. Intrerupătoarele cu vid sunt aparate tripolare prevăzute cu mecanism de acționare cu resorturi, întregul ansamblu

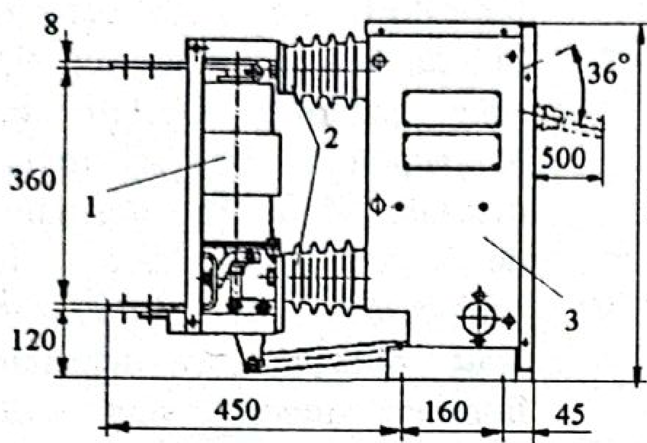


Fig.4.12

Arhitectura întrerupătorului cu vid: 1-capsulă vidată; 2-izolatoare suport; 3-mecanism de acționare.

fiind amplasat pe șasiu metalic comun. Construcția poate fi realizată în variantă fixă sau debroșabilă. Coloanele celor trei poli, conținând camerele de stingere, sunt protejate la exterior prin cilindri electroizolanți.

Aceștia au rol de prevenire a impactului mecanic și de limitare a efectelor unui mediu eventual poluat. Construcția camerei de stingere vidate diferă după modul de amplasare a ecranelor metalice. Din acest punct de vedere există două variante de bază, reprezentate în Fig.4.13, [21], [24], [27].

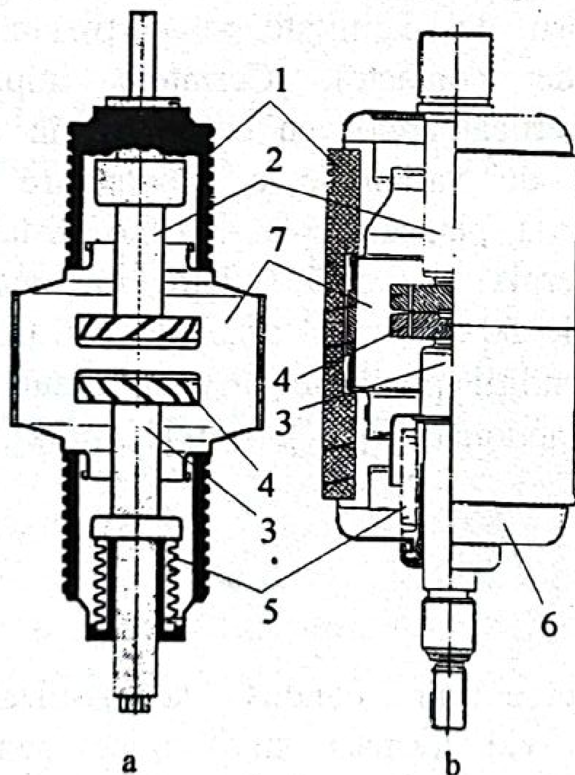


Fig.4.13

Capsulă vidată: a-cu ecran exterior; b-cu ecran interior; 1-anvelopă electroizolantă ceramică; 2-contact fix; 3-contact mobil; 4-electrozi; 5-burduf metalic de etanșare; 6-capac; 7-ecran.

Corespunzător variantei din Fig.4.13a, ecranul metalic 7 se confundă cu peretele capsulei vidate în zona contactelor, și se continuă în ambele sensuri cu anvelopele ceramice 1.

Construcția din Fig.4.13b diferă prin aceea că ecranul metalic este amplasat în interiorul camerei de stingere, ocupând aproape toată înălțimea acesteia, în jurul contactelor. Datorită distanței mici dintre contacte și conductivității înalte a vaporilor metalici care apar la deconectare,

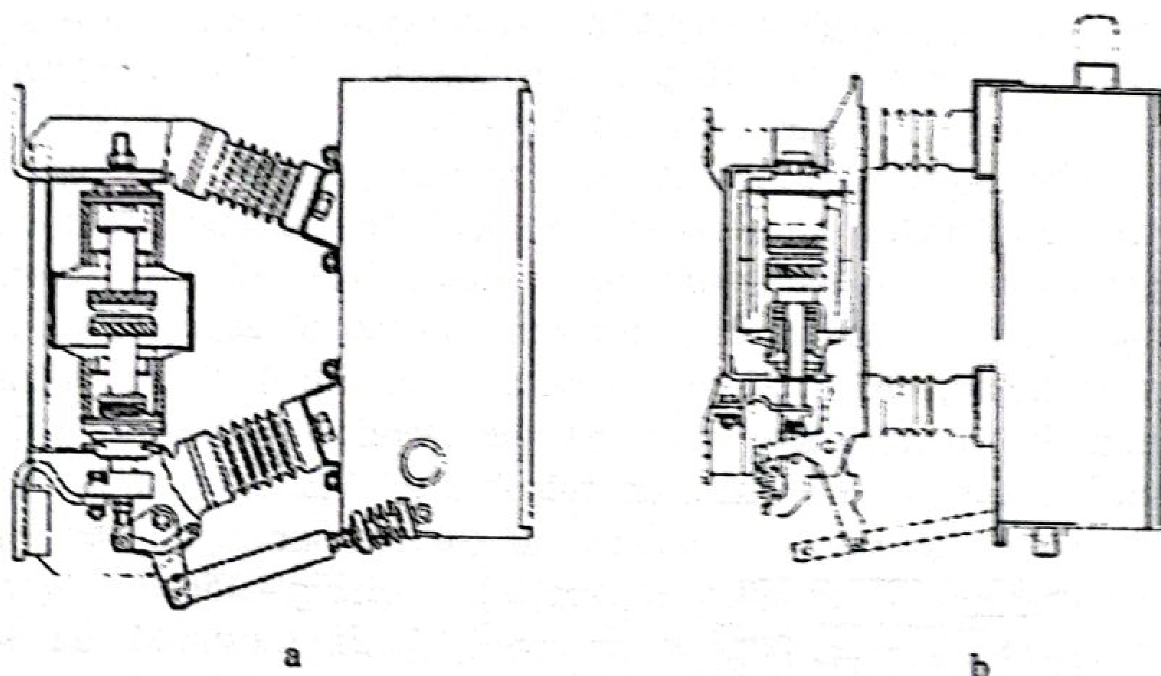


Fig.4.14
Construcţia întrerupătoarelor cu vid: a-de tip normal; b-de tip greu.

căderea de tensiune pe coloana arcului electric are valori scăzute.

De asemenea, durata redusă de ardere a arcului de deconectare conduce la valori reduse pentru energia disipată sub formă de căldură de coloana sa. Toate acestea au efecte favorabile asupra prelungirii duratei de funcţionare a contactelor şi ansamblului camerei de stingere.

In principiu construcţia întrerupătorului depinde de cea a camerei de stingere utilizate, aşa cum rezultă şi din Fig.4.14, în care se prezintă întrerupătoare ale firmei Siemens, [21].

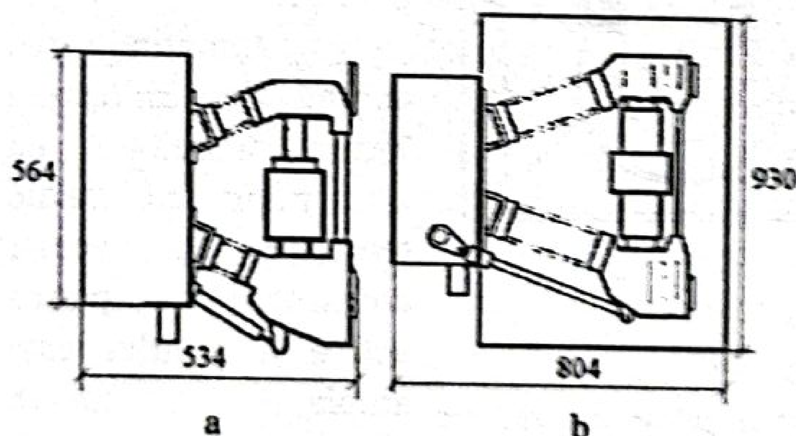


Fig.4.15
Dimensiuni de gabarit pentru întrerupătoare cu vid: a-7,2 kV/1250 A/25 kA; b-36 kV/2500 A/25 kA.

Comparativ cu întrerupătoarele normale (Fig.4.14a) aparatele grele, destinate unor curenţi nominali de valori mari, sunt prevăzute la cele două extremităţi ale camerei de stingere vidate cu radiatoare, capabile să

asigure regimul termic adecvat. In acest caz creşterea gabaritelor poate fi mai uşor rezolvată prin amplasarea oblică a izolatoarelor suport, aşa cum se poate vedea în Fig.4.14b.

Pentru niveluri diferite de tensiune, chiar dacă acestea aparţin domeniului tensiunilor medii, este necesară adaptarea lungimii liniei de conturnare pe suprafaţa exterioară a capsulei vidate, fapt care conduce la dimensiuni de gabarit dependente, între anumite limite, de tensiunea nominală. In Fig.4.15 se prezintă comparativ întrerupătoare cu vid de fabricaţie Siemens [21], construite pentru tensiunile nominale de 7,2 kV (Fig.4.15a), respectiv 36 kV (Fig.4.15b).

In construcţii de dată recentă ale unor firme ca Zwar-Polonia [22], [26] şi ABB [25], [27] se renunţă la cele două izolatoare suport, orizontale sau înclinate (Fig.4.14, 4.15) prin intermediul cărora se face montarea pe şasiu a polului.

Amintind mai curând de arhitectura întrerupătoarelor cu ulei puţin de medie tensiune, la aceste construcţii partea activă a polului este amplasată într-un cilindru electroizolant care, fixat doar cu baza pe şasiu, asigură protecţia ansamblului

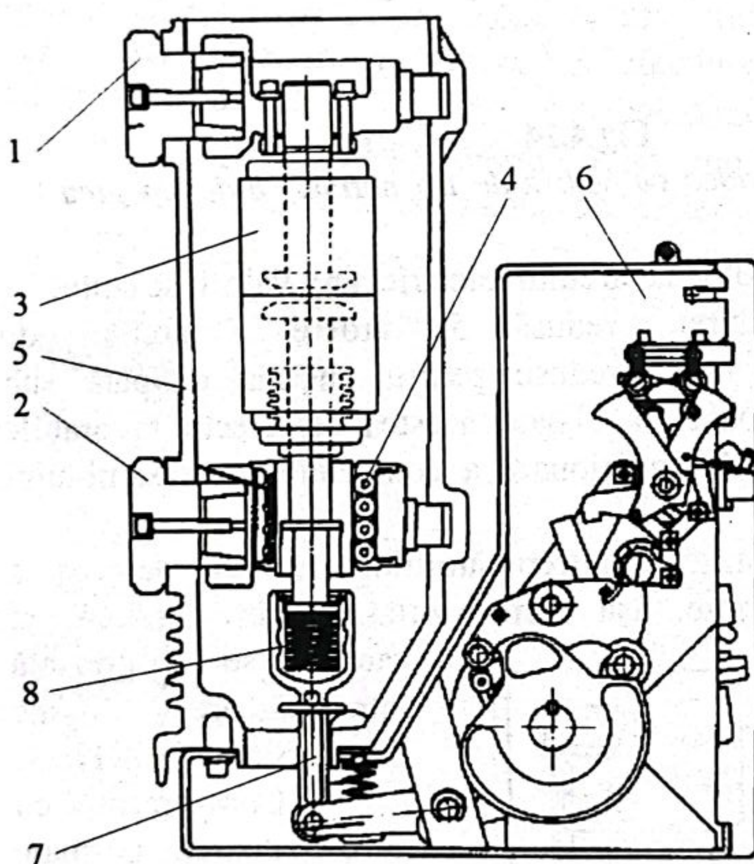


Fig.4.16

Secţiune prin polul unui întrerupător cu vid tip VD 4 (ABB): 1, 2-borne de conexiuni; 3-capsulă vidată; 4-contact alunecător; 5-cilindru electroizolant exterior; 6-mecanism de acţionare; 7-transmisie electroizolantă; 8-resort.

din interior contra atingerii și izolația externă a polului față de pământ.

In Fig.4.16 este reprezentată o secțiune prin polul unui întrerupător cu comutație în vid tip VD4, de fabricație ABB [25], [27]. Construite pentru tensiuni de 12-17,5-24 kV și curenți nominali de 630-1250 A, aceste aparate pot întrerupe, cu o durată de arc mai mică de 15 ms, curenți de scurtcircuit de până la 40 kA, [27].

Calea de curent este constituită din bornele de conexiuni 1, 2, contactele capsulei vidate 3 și contactul alunecător 4, realizat de tipul pivotant sau cu role, în funcție de intensitatea curentului nominal. La acționare, mișcarea se transmite contactului mobil prin tija electroizolantă 7 și resortul 8, ultimul având rolul de a realiza forța necesară de apăsare în contact.

In Fig.4.17 se prezintă schema lanțului cinematic al mecanismului de acționare [27], care echipează întrerupătoarele ABB tip VD4. Armarea mecanismului se face manual, prin acționarea repetată a levierului 1 și înmagazinarea energiei în resortul 2. La închiderea întrerupătorului se armează resortul de deschidere 3. Comenzile de închidere-deschidere se pot da fie de pe aparat, fie de la distanță, prin intermediul unor declanșatoare electromagnetice.

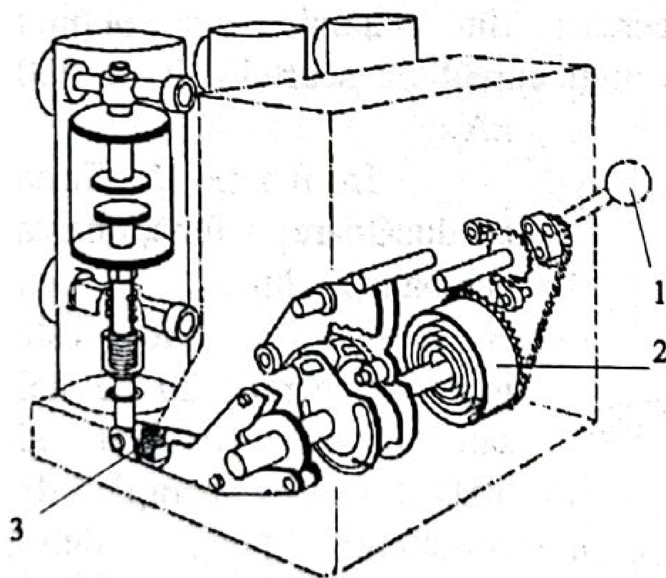


Fig.4.17

Mecanismul de acționare al întrerupătoarelor tip VD4: 1-levier; 2-resort de închidere; 3- resort de deschidere.

O particularitate a funcționării întrerupătoarelor cu vid o constituie emisia de radiații X atunci când aparatul este sub tensiune și cu contactele deschise. Tratat ca sursă de radiații, întrerupătorul cu vid face obiectul normalizărilor în domeniu, standardele precizând nivelul admis de radiație.

Din acest punct de vedere, cerințe importante se impun mecanismului de acționare și

lanţului cinematic de transmisie a mişcării la contacte, intensitatea radiaţiei X fiind dependentă, la o tensiune dată, de distanţa stabilită între contactele deschise.

4.4. Utilizarea tehnicii de comutaţie în vid

Deşi la niveluri superioare de tensiune sunt cunoscute şi aplicaţii atipice, în prezent se asistă la generalizarea utilizării întrerupătoarelor cu vid în domeniul instalaţiilor de medie tensiune (6...35 kV). Pentru aceste tensiuni, întrerupătoarele construite au curenţi nominali de până la 2500...3000 A şi pot atinge valori ale capacităţii nominale de rupere la scurtcircuit de 25...40 kA la 12 kV [25], în perspectivă tinzându-se spre 40...100 kA pentru tensiunea de 13,8 kV, [18].

Firmele europene fabrică aparate cu parametrii menţionaţi şi studiază extinderea acestora la 4000 A curent nominal şi 63 kA capacitate nominală de rupere la scurtcircuit, pentru niveluri de 12...15 kV ale tensiunii nominale.

In laboratoarele de încercări din Japonia s-a obţinut întreruperea, la medie tensiune, a unui curent de scurtcircuit de 200 kA.

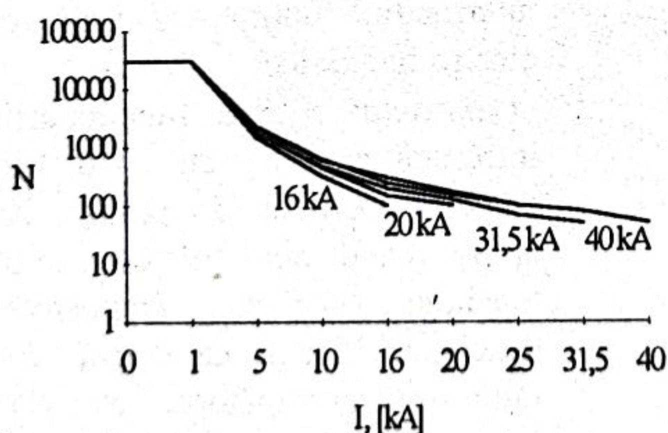


Fig.4.18
Dependenţa numărului admisibil de deconectări în raport cu intensitatea curentului întrerupt

In funcţie de firma producătoare, funcţionarea echipamentului cu comutaţie în vid este garantată pentru 20 de ani sau pentru 10 ani şi 30.000 de operaţii de comutaţie, [11]; dintre acestea circa 50...100 deconectări pot fi efectuate la capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit, [2].

In Fig.4.18 se prezintă dependenţa numărului admisibil N de acţionări în funcţie de intensitatea

curentului de scurtcircuit deconectat, caracteristic întrerupătoarelor cu vid de fabricație ABB, [27].

Se apreciază că [11], perspectivele extinderii echipamentului cu comutație în vid la tensiuni nominale mai mari de 72,5 kV sunt limitate de necesitatea creșterii exagerate a distanțelor dintre contacte, a lungimii liniilor de conturnare corespunzătoare izolației interne și externe precum și datorită unei construcții în final complicate a acestor echipamente. Cu toate acestea [18], firma Toshiba are în fabricație un întrerupător cu vid de 84 kV/1250A/25 kA, pentru utilizări speciale fiind realizat și un întrerupător cu tensiunea nominală de 168 kV și capacitatea nominală de rupere la scurtcircuit de 40 kA; tot în laboratoarele firmelor japoneze [18], se încearcă întrerupătoare cu tensiunea nominală de 145 kV, precum și echipamente cu comutație în vid pentru curent continuu la tensiunea de 250 kV, având izolația externă în hexafluorură de sulf.

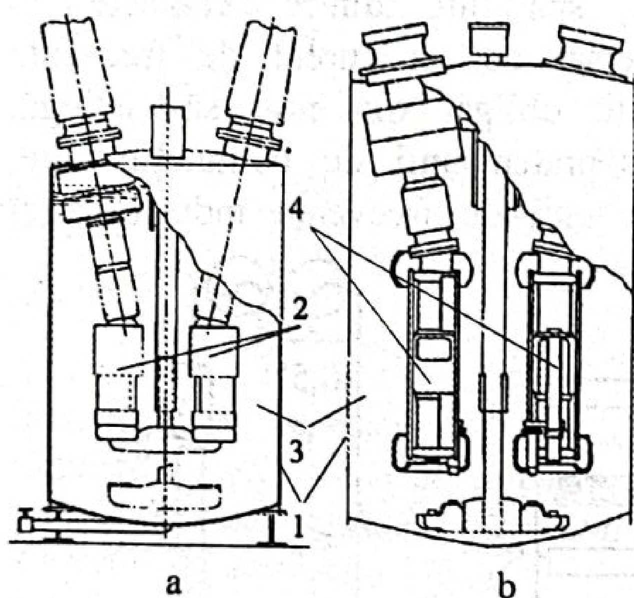


Fig.4.19

Prelungirea duratei de funcționare a unui întrerupător cu ulei mult: a-tehnica tradițională: 1-cuvă; 2-camere de stingere cu comutație în ulei; 3-ulei mineral; b-utilizarea capsulelor vidate: 4-camere de stingere cu comutație în vid avansat.

Experimente interesante sunt efectuate în vederea prelungirii duratei de funcționare a unor întrerupătoare cu ulei mult (Fig.4.19a), prin substituirea camerelor de stingere originale cu capsule vidate, [15].

Dezavantajele celor două tehnici se compensează, astfel încât echipamentul hibrid de comutație obținut are capacitate de deconectare la scurtcircuit mărită dată de capsulele vidate care, la rândul lor, funcționează la niveluri superioare de tensiune (123 kV), datorită izolației externe realizată prin imersare în ulei mineral (Fig.4.19b).

Unele rezerve ale utilizatorilor față de întrerupătoarele cu vid sunt fondate pe ideea că funcționarea acestora este însoțită la deconectare de supratensiuni de

comutaţie mai mari decât cele întâlnite la alte echipamente. Studiul supratensiunilor de comutaţie menţionate arată că acestea pot fi produse ca urmare a tendinţei de tăiere a curentului la deconectare şi a fenomenelor de reamorsare repetată a arcului electric.

Deconectarea cu tăiere (smulgere) de curent, aşa cum s-a arătat în § 4.2, depinde de particularităţile arderii şi stingerii arcului electric în vid avansat. Supratensiunile de comutaţie provocate de acest mod de funcţionare se consideră totuşi a fi neglijabile [12], mai ales în condiţiile limitărilor considerabile ale curentului tăiat, impuse prin soluţii tehnologice aplicate sistemului de contacte.

Fenomenul de reamorsare multiplă a arcului electric se poate iniţia atunci când separarea contactelor are loc cu foarte puţin timp înainte de momentul anulării intensităţii curentului. Din acest motiv distanţa dintre contacte, înregistrată în momentul stingerii arcului şi apariţiei supratensiunii de comutaţie aferente, este foarte redusă. Ca urmare se produce străpungerea spaţiului dintre contacte şi reamorsarea unui arc electric traversat de un curent de frecvenţă ridicată, pe care întrerupătorul este obligat din nou să-l stingă. Acest fapt conduce la repetarea supratensiunii de comutaţie care, produsă în condiţiile creşterii curentului de frecvenţă industrială şi

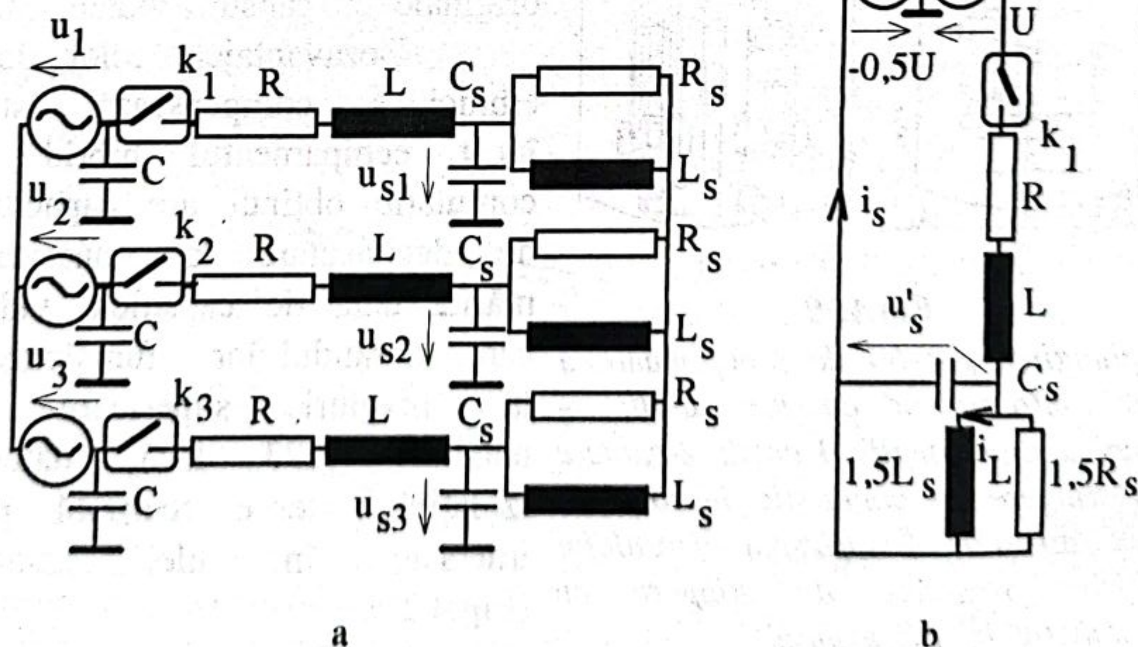


Fig.4.20

Reamorsarea repetată a arcului electric: a-schema trifazată completă; b-circuitul echivalent.

deci a energiei magnetice înmagazinate în câmpul magnetic al bobinelor, are ea însăşi valori crescute.

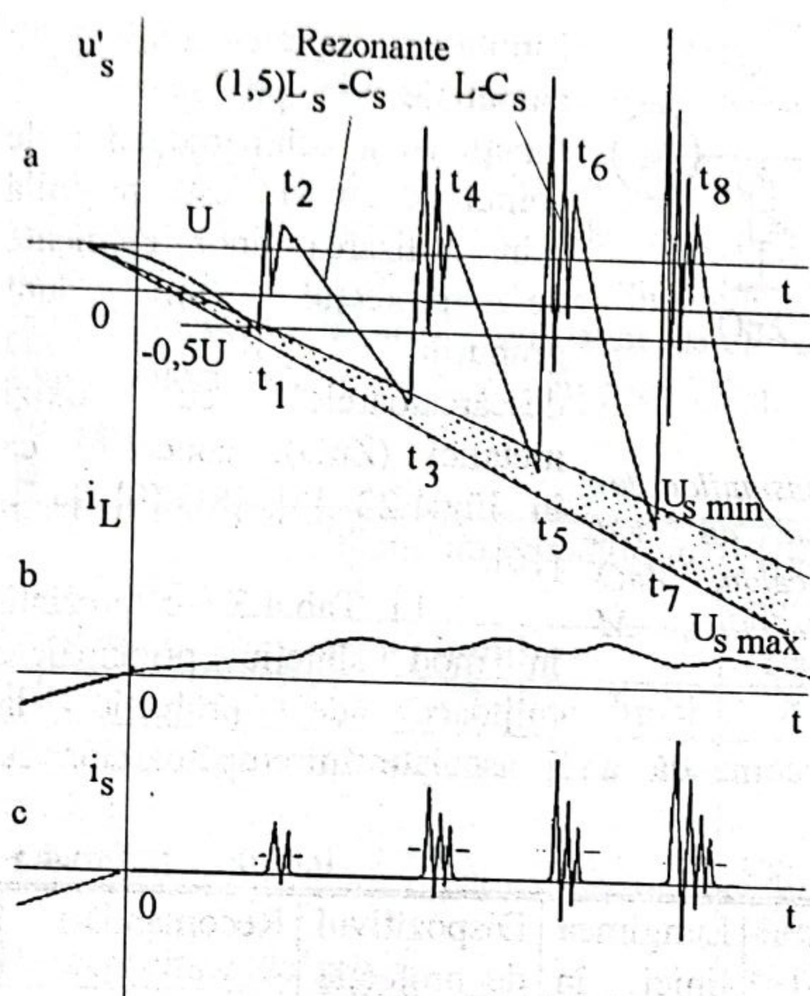


Fig.4.21

Reamorsarea repetată a arcului electric în întrerupătoarele cu vid: a-tensiunea la bornele circuitului de sarcină; b-curentul inductiv; c-curentul de sarcină.

Schema electrică trifazată care permite calculul parametrilor (Fig.4.20a), conduce la circuitul echivalent reprezentat în Fig.4.20b, [24].

Pe durata unei semiperioade a semnalului de frecvenţă industrială în curba curentului de sarcină i_s apar trenuri de oscilaţii de frecvenţă ridicată (Fig.4.21), care se repetă până când distanţa între contacte devine suficient de mare, astfel încât străpungerea să nu mai fie posibilă. Reamorsarea repetată a arcului electric într-un întrerupător cu vid se soldează cu supratensiuni de comutaţie având fronturi mai mult sau mai puţin abrupte, cu factor de amplitudine de câteva unităţi. Acestea nu se consideră periculoase dar, dacă sunt frecvente, pot accentua îmbătrânirea izolaţiei, [12].

In cazul unui cuplaj capacitiv strâns între conductoarele de fază, prin reamorsarea repetată a arcului electric pe una din faze este posibilă modularea curentului de arc pe celelalte, cu riscul unei întreruperi anticipate. Fenomenul este mai periculos decât deconectarea cu tăiere de curent, deoarece energia magnetică a

circuitului poate avea valori foarte mari în momentul stingerii arcului electric, ceea ce conduce la supratensiuni de comutaţie considerabile.

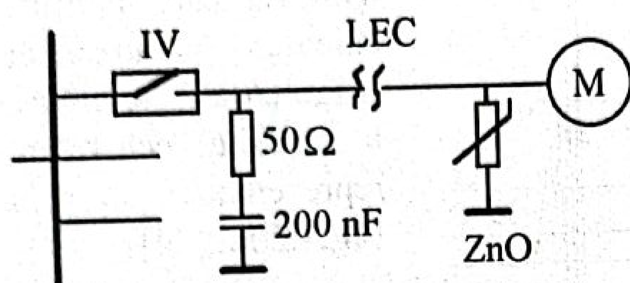


Fig.4.22

Protecţia împotriva supratensiunilor de comutaţie: IV-întrerupător cu vid; LEC-linie electrică în cablu; ZnO-descărcător cu oxizi metalici; M-electromotor.

Limitarea supratensiunilor de comutaţie produse la funcţionarea echipamentelor de comutaţie cu vid este posibilă prin utilizarea unor elemente de protecţie cum sunt grupurile RC sau descărcătoarele cu oxizi metalici (ZnO), conectate ca în Fig.4.22 [5], [8], [9], [14], [16].

In Tab.4.3 se prezintă în mod sintetic principalele mijloace de protecţie la supratensiuni care se recomandă a fi asociate întrerupătoarelor cu comutaţie în vid, [12].

Tab.4.3

Tipul de receptor	Curentul de pornire, [A]	Lungimea liniei în cablu, [m]	Dispozitivul de protecţie	Recomandări
Transformatoare				
Maşini sincrone				
Motoare (pompe, ventilatoare etc.)	>1000			
	<1000			ZnO pentru porniri foarte frecvente
	>1000			ZnO pentru blocări foarte frecvente
Motoare cu rotor blocat (concasoare etc.)	<1000, >250			ZnO
	<250	<100	ZnO	

Tab.4.3 (continuare)

		>100	R-C: 50 Ω, 200 nF	
Cuptoare cu arc			RC și ZnO	

Tehnica vidului avansat permite în momentul de față realizarea unor echipamente de comutație cu parametri electrici având valori performante și cu indicatori de fiabilitate deosebit de înalți; elocvente în acest sens sunt datele din Tab.4.4, referitoare la întrerupătoare de producție europeană [3], din clasa 24 kV/630 A/ 16 kA.

Tab.4.4

Caracteristica / Tipul întrerupătorului	Ulei puțin	SF_6	Vid
Deplasarea contactelor, [mm]	150	50	14
Viteza contactelor la deschidere, [m/s]	4	2	1
Numărul de întreruperi pînă la revizie:			
-la curent nominal	500... 1000	10^4	2.10^4
-la capacitate de rupere	6-10	20-30	50-100
Anduranța mecanică, cicluri I-D	10^4	10^4	2.10^4
Periodicitatea reviziilor, [ani]	1 - 3	10	10
Preț orientativ, [%]	100	130	160

In comparație cu alte clase de echipamente utilizate în comutația de putere, întrerupătoarele cu vid se caracterizează prin parametri electrici performanți, realizând un raport capacitate de comutație/masă (volum, dimensiuni de gabarit) dintre cele mai bune. Construcția foarte compactizată răspunde cerințelor de miniaturizare și permite extinderea fără dificultate a spațiilor necesare echipamentelor asociate din instalație (terminale de cablu, transformatoare și instrumente de măsurare, echipament secundar etc.

Pe durata funcționării, mediul electroizolant și de stingere nu suferă pierderi, deci nu trebuie completat; mai mult, întrerupătoarele cu vid nu sunt poluante, caracterizându-se prin

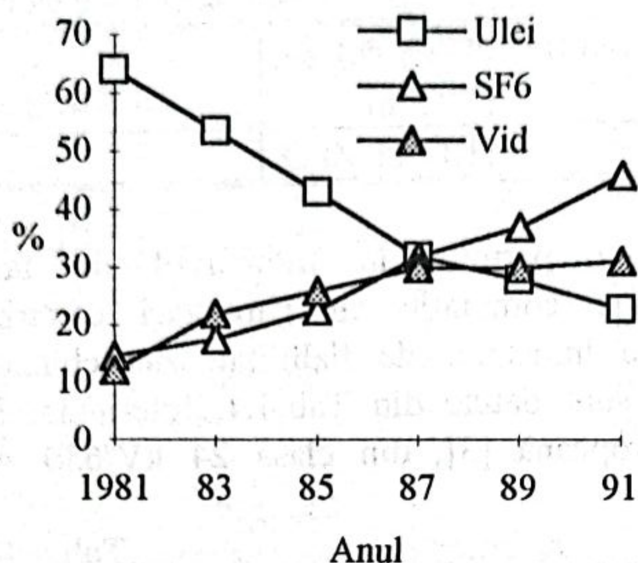


Fig.4.24

Evoluția tehnicilor de comutație în instalațiile de medie tensiune din țările vest-europene.

niveluri scăzute de zgomot și lipsa pericolului de incendiu. Valorile mici ale distanței de deplasare a contactelor și masei echipajului mobil permit acționarea cu energie redusă, motiv pentru care mecanismele de acționare cu resorturi utilizate au anduranța mecanică extrem de înaltă și funcționează practic fără mentenanță.

In prezent, generalizarea utilizării întrerupătoarelor cu comutație în vid avansat reprezintă o bună alternativă în raport cu celelalte tehnici moderne de comutație.

Aceasta rezultă și din Fig.4.24 [20], unde este reprezentată dinamica introducerii în ultimii ani a tehnicii de comutație în instalațiile de medie tensiune din țările vest-europene.

Bibliografie

1. Baraboi A., Furnică E., Tendințe actuale în tehnica echipamentelor de comutație cu vid. Energetica, 37, 7, 304 (1989).
2. Bretting J., Kindler H., Neue Vakuumschaltkammern für Mittelspannungsschaltanlagen, Elektrotechnik und Maschinenbau, 12, 532 (1982).
3. Bronstein A. M., Kozlov V. B., Sovremennoe sostoianie i tendenții razvitiia vîkliuciatelei vîsokogo napriajeniia. Elektricestvo, 11, 10 (1987).
4. Eliker A., Interaction entre mécanisme de commande et fonctionnement des bouteilles à vide. Bull. sci.

Assoc. ing. élec. sortis Inst. élec. Montefiore, 39, 3, 4 (1986).
5. Fakkar A., Bui A., Loubière A., Penchenat G., Modélisation thermique des varistances à base d'oxyde de zinc. RGE, 1, 26 (1993).
6. Falkingham L. T., Recent advances in vacuum interrupter design. GEC Review, 2, 3 (1986).
7. Flurscheim C. H., Teoriia i konstrukţii vîkliuciatelei. Energoizdat, Leningrad, 1982 (trad. din lb. engleză).
8. Gavrilaş N., Guşă M., Baraboi A., Asupra unor mijloace moderne de protecţie a instalaţiilor împotriva supratensiunilor. Energetica, 35, 2, 73 (1988).
9. Hutter W., Schuker R., Protection des moteurs haute tension contre les surtensions. Revue Brown Boveri, 10, 592 (1986).
10. Kurosowa Y., Sugawara H., Kawakubo Y., Abe N., Tsuda H., Vacuum circuit breaker electrode generating multiple axial magnetic field and its interruption ability. IEEE Trans. Power App. and Syst., 99, 6, 2079 (1980).
11. Lerondeau A., Position du disjoncteur à vide dans l'évolution des techniques de coupure. Bull. sci. Assoc. ing. élec. sortis Inst. élec. Montefiore, 39, 3, 9 (1986).
12. Morant M., Legros W., Comportemenet du disjoncteur à vide dans les réseaux moyenne tension. RGE, 3, 36 (1995).
13. Pelenc Y., Appareillage électrique d'interruption à haute tension. Techniques de l'ingénieur, 12 (1991).
14. Rousseau A., Hassanzadeh M., Malpiece F., Parafoudre à oxyde de zinc pour réseaux HT A Fabrication et utilisation. RGE, 11, 81 (1992).
15. Slade P. G., Voshall R. E., Wayland P. O., Bamford A., McCracken G., Yeckley R., Spindle H., The Development of a Vacuum Interrupter Retrofit for the Upgrading and Life Extension of 121 kV-145 kV Oil Circuit Breakers. IEEE Trans. on Power Delivery, 6, 3, 1124 (1991).

16. Telander S. H., Wilhelm M. R., Stump K. B., Surge limiters for vacuum circuit breaker switchegear. IEEE Trans. Power Deliv., 2, 1, 107 (1987).
17. Yamanaka T., Takeya Y., Yorita M., Horiuchi T., Inagaki K., Naya E., Demizu M., Okumura M., Electrode composition for vacuum switch. Pat. SUA 4537743, 1985.
18. Yanabu S., Okawa M., Kaneko E., Tamagawa T., Use of axial magnetic fields to improve high current vacuum interrupters. Proc. XII th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, New York, 186 (1986).
19. Zeitoun-Fakiris Anne, Isolation sous vide. Techniques de l'ingénieur, 9 (1991).
20. * * * Distribution HTA. Appareillage SF6. Disjoncteurs Fluarc 1 à 38 kV, contacteurs Rollarc 1 a 12 kV. Catalogue Merlin Gerin AC0372 (1993).
21. * * * Hochspannungsgeräte bis 36 kV. Siemens Katalog HG 11 (1982).
22. * * * Indoor Vacuum Circuit-Breaker type WV31. Information leaflet WV31/05/2/02. Catalogue ZWAR, Poland.
23. * * * L'arc électrique et ses applications. Ed. CNRS, Paris, 1984.
24. * * * Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers. Ed. by Kunio Nakanishi, Marcel Dekker Inc. New York-Basel-Hong Kong, 1991.
25. * * * Vacuum Circuit-Breakers Type VD4. Leaflet No.1387/7E. Catalogue ABB Calor-Emag.
26. * * * Vacuum Circuit-Breaker type WVK. Information leaflet WVK/05/2/02. Catalogue ZWAR, Poland.
27. * * * VD4 Vacuum Circuit-Breaker. Instruction Manual BA 352/6 E, No. GCEA 67 0352 P0102, ABB Calor-Emag.

Capitolul 5

COMUTAȚIA DE PUTERE IN SISTEMELE FLEXIBILE DE TRANSMISIE A ENERGIEI

In cadrul sistemelor flexibile de transmisie a energiei se regăsesc sistemele de transport în curent continuu (c.c.) la înaltă tensiune și sistemele de transmisie în curent alternativ (c.a.) prevăzute cu echipamente electronice capabile să realizeze controlul circulațiilor de puteri și creșterea capacității de transport până la limitele admisibile. Echipamentele electronice precum convertoarele din stațiile de conversie ale sistemelor de transmisie în c.c., compensatoarele statice transversale sau longitudinale, regulatoarele universale de putere, etc. din sistemele de transmisie în c.a. sunt realizate cu ajutorul dispozitivelor semiconductoare de putere.

5.1. Dispozitive semiconductoare de putere

Principalele dispozitive semiconductoare de putere întâlnite în schemele electrice ale echipamentelor electronice de putere sunt: dioda, tiristorul, triacul, tiristorul cu blocare pe poartă (GTO), tranzistorul bipolar de putere, tranzistorul cu grilă izolată (IGBT), tiristorul controlat MOS (MCT).

Dioda este formată dintr-o joncțiune P-N, realizată .într-un monocristal de siliciu sau germaniu, prevăzută cu contacte metalice atașate celor două regiuni, contacte denumite anod (atașat zonei P) și respectiv catod (atașat zonei N).

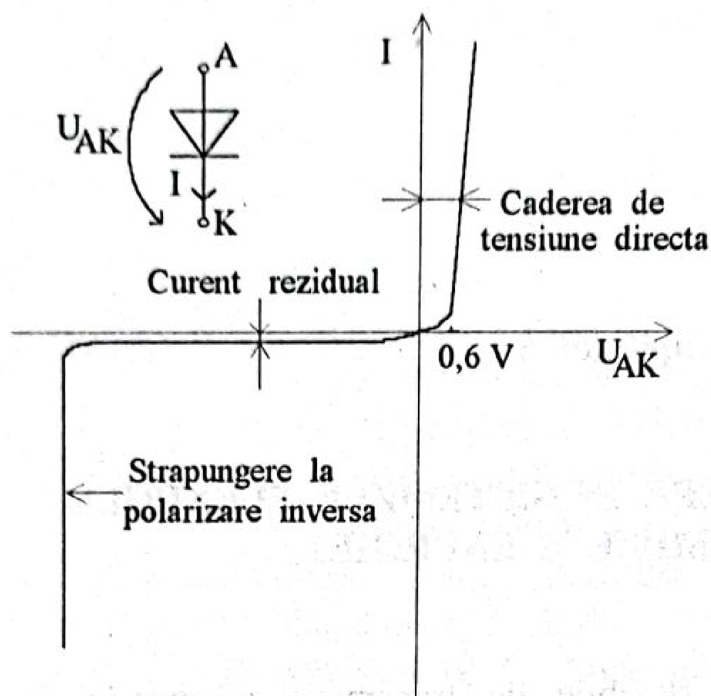


Fig.5.1
Simbolul și caracteristica diodei

In Fig.5.1 este reprezentată caracteristica statică a unei diode ce ne dă dependența curentului ce o străbate de tensiunea la bornele sale. Aplicând la anod o tensiune pozitivă în raport cu catodul va apare un curent odată ce bariera de potențial (0,6 V pentru siliciu sau 0,2 V pentru germaniu) a fost depășită și o cădere de tensiune directă de ordinul a 0,7 V la valoarea curentului nominal al diodei. La aplicarea unei tensiuni inverse prin diodă va circula un curent invers foarte mic denumit curent rezidual sau de fugă. Dacă tensiunea inversă crește peste valoarea tensiunii de străpungere se produce fenomenul multiplicării în avalanșă a purtătorilor de sarcină și joncțiunea se străpunge. Curentul tipic rezidual în cazul diodelor de putere este de ordinul miliamperilor.

Tiristorul denumit și diodă comandată este un dispozitiv semiconductor cu patru straturi PNPN și are o a treia bornă pentru comandă denumită poartă (grilă).

In Fig.5.2a se prezintă caracteristica unui tiristor cu poarta în gol. Caracteristica sa este bistabilă, cu rezistență negativă tip S, dar regiunea de rezistență negativă este foarte abruptă și poate fi parcursă numai prin salt. Caracteristica inversă (catod pozitiv) a tiristorului seamănă cu cea a unei diode, iar caracteristica directă (anod pozitiv) arată că numai curentul rezidual direct circulă până la atingerea tensiunii de străpungere în avalanșă (tensiunea de întoarcere-V_{B0}). Odată atinsă tensiunea de întoarcere dispozitivul se comportă ca o diodă cu două joncțiuni înseriate în conducție, ceea ce dă o cădere de tensiune în direct de aproximativ două ori mai

mare decât în cazul unei diode. Curentul care parcurge tiristorul în această situaţie, va fi dictat în special de către sarcina din circuitul în care este înseriat tiristorul.

Pentru ca tiristorul ce a fost adus în starea de conducţie (amorsat) să nu se blocheze (stingă) trebuie ca valoarea curentului să atingă nivelul de agăţare şi să nu scadă sub nivelul celui de menţinere (I_H). Curentul de agăţare, I_L, este de obicei dublul curentului de menţinere, dar ambii sunt mici în raport cu valoarea curentului nominal (sub 1% I_n), [7].

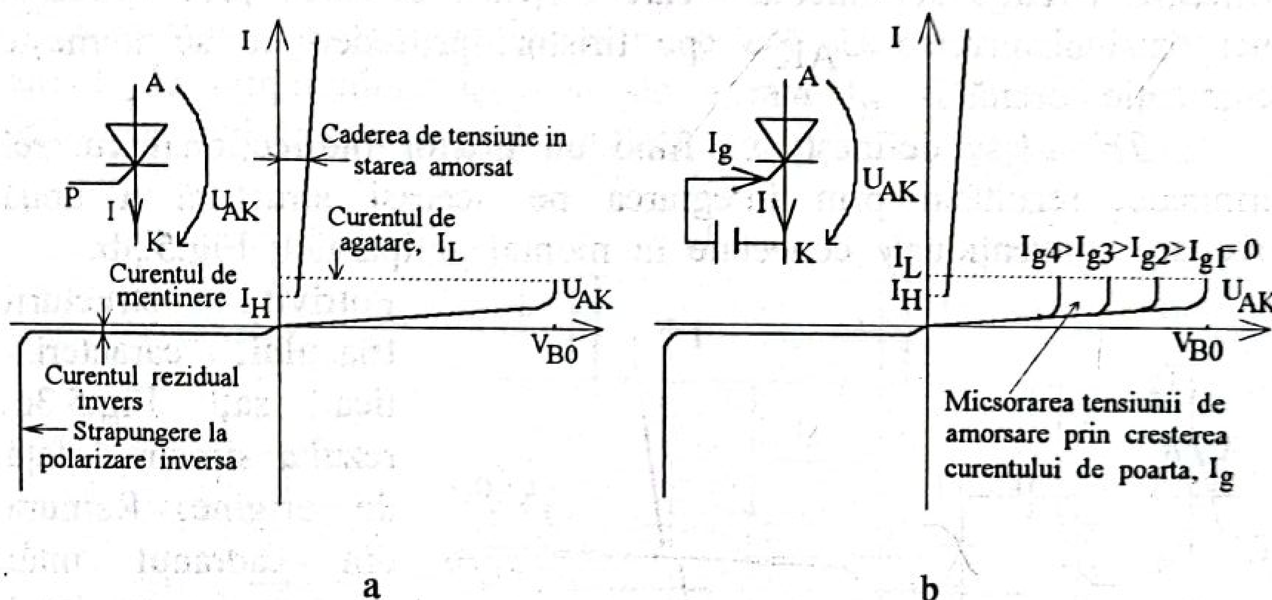


Fig.5.2

Caracteristica tiristorului: a-fără curent de poartă; b-cu curent de poartă.

Deoarece tensiunea de break-over (întoarcere) este de ordinul sutelor de volţi, amorsarea prin atingerea acestei tensiuni nu este permisă deoarece se disipă puteri foarte mari, care distrug tiristorul după câteva amorsări similare.

Injecţia unui curent pozitiv de către poartă spre catodul negativ aduce tiristorul deja polarizat direct (anod pozitiv) în starea amorsat, Fig.5.2b. Rolul curentului de poartă, I_g, este de a injecta goluri în stratul interior P, care împreună cu electronii stratului N, de catod, provoacă avalanşa joncţiunii mediane de comandă şi aduce tiristorul în stare de conducţie. Dacă curentul anodic depăşeşte curentul de agăţare, I_L, curentul de poartă se poate anula, tiristorul fiind în conducţie nu mai este influenţat de condiţiile din

circuitul de poartă. Creşterea curentului de poartă duce la micşorarea tensiunii de amorsare a tiristorului.

Pentru blocarea sau dezamorsarea tiristorului, trebuie scăzut curentul anodic sub cel de menţinere şi trebuie acordat un timp (timp de dezamorsare sau stingere-t_q) relativ mare, 10...100 μs, înainte de a putea aplica din nou o tensiune în sens direct pe el, fără reamorsarea intempestivă a acestuia. De obicei, în curent alternativ scăderea curentului are loc în mod natural, periodic, caz în care este vorba de "comutaţia naturală". In curent continuu, se utilizează circuite suplimentare care forţează blocarea prin aplicarea unei tensiuni inverse $U_{AK}<0$ pe tiristor, procedeu ce se numeşte "comutaţie forţată".

Triacul se defineşte ca fiind un tiristor bidirecţional cu trei terminale, rezultând prin integrarea pe aceeaşi structură a două tiristoare convenţionale conectate în montaj antiparalel, Fig.5.3b.

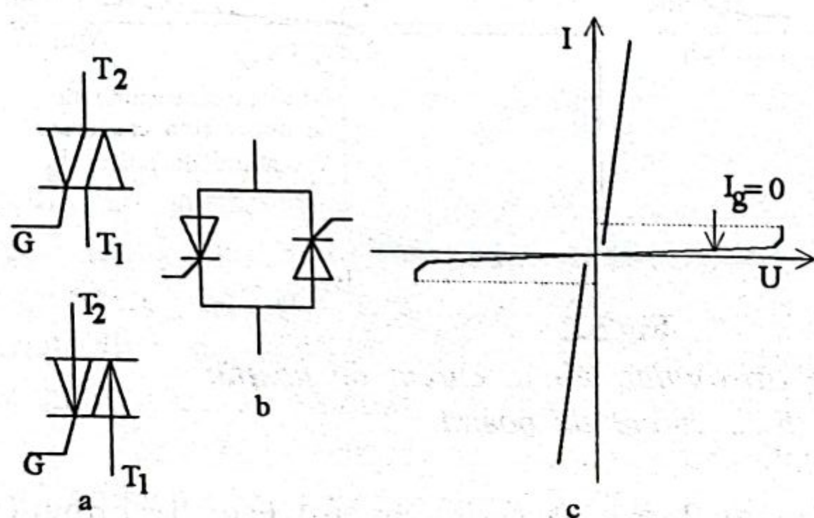


Fig.5.3
Triacul: a-simbol; b-structura echivalentă cu tiristoare; c-caracteristica pentru curent de poartă nul.

Potrivit structurii triacului, caracteristica sa, Fig.5.3c, rezultă simetrică faţă de origine. Ramura din cadranul întâi corespunde tensiunii pozitive aplicate terminalului T_2 în raport cu T_1. Dispozitivul lucrează ca întrerupător comandat în curent (funcţie similară cu a unui releu, dar fără a avea contacte în mişcare). Triacul poate fi amorsat prin curent de poartă pozitiv sau negativ, dar el este mai sensibil la curent pozitiv injectat atunci când terminalul T_2 este pozitiv şi la curent negativ dacă terminalul T_1 este pozitiv. In practică se utilizează aproape întotdeauna curentul de poartă negativ pentru comanda triacului, deoarece

sensibilitatea triacului este mai uniformă atât la polarizare pozitivă cât și negativă pe terminalul T_2, [2].

Triacul are performanțe dinamice (di/dt, du/dt, t_q) în general mai slabe decât ale tiristorului.

Tiristorul cu blocare pe poartă-GTO (Gate Turn Off Thyristor) este un dispozitiv cu structura PNPN denumit și tiristor bioperațional, care poate fi integral comandat (amorsat respectiv blocat) prin aplicarea de semnale pe poartă: cu semnal pozitiv poate fi trecut în conducție, iar cu semnal negativ poate fi blocat.

Această funcționare este prezentată în Fig.5.4. Tiristorul GTO este amorsat prin aplicarea pe poartă a unui impuls pozitiv de curent de amplitudine I_{GT} și de durată t_p și este blocat prin aplicarea unui implus negativ, având amplitudinea I_{GB} și durată t_n.

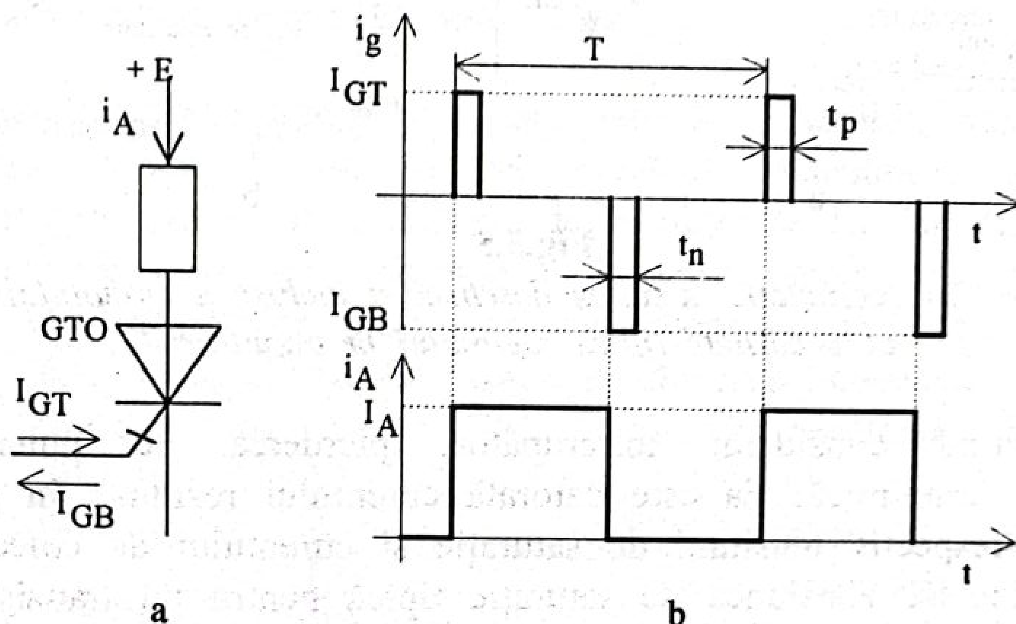


Fig.5.4

Tiristorul cu blocare pe poartă: a-simbolul; b-impulsurile de comandă pe poartă și curentul anodic.

In general durata impulsului de blocare t_n are valori cuprinse între 5...50 μs, amplitudinile impulsurilor fiind în relația $I_{GB}>I_{GT}$. O limitare funcțională importantă apare la curenți anodici de mică intensitate, când tiristorul GTO nu mai poate fi blocat, indiferent cât de mare este impulsul negativ aplicat pe poartă.

Utilizarea tiristoarelor GTO în locul celor convenționale conduce la simplificări notabile atât în circuitele de forță cât și în cele de comandă.

Tranzistorul bipolar este un dispozitiv semiconductor comandabil cu trei straturi PNP sau NPN având trei terminale din care unul de comandă (baza).

In aplicaţiile de putere, tranzistorul funcţionează, de obicei în comutaţie (ca comutator). La curent de bază nul, tranzistorul este blocat, iar circuitul este considerat deschis, Fig.5.5a, iar la curentul de bază care îl aduce în saturaţie el este practic ca un întrerupător închis.

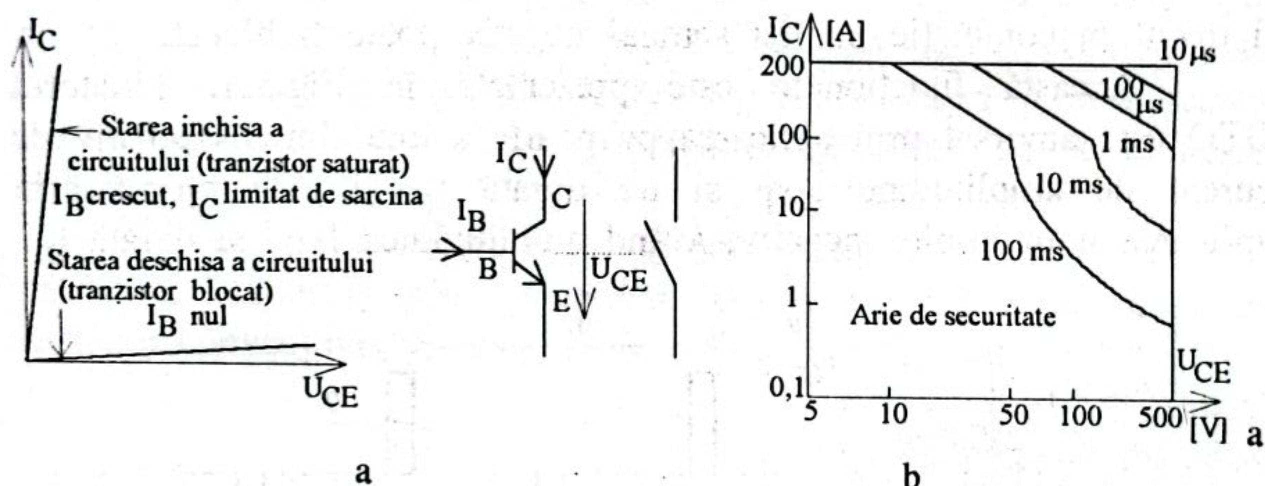


Fig.5.5

Tranzistorul în comutaţie: a-starea deschisă şi închisă a circuitului; b-aria de securitate tipică regimului în impulsuri.

Fiind considerat întrerupător, pierderea de putere pe tranzistor este mică. Ea este datorată curentului rezidual, în poziţia deschis, respectiv tensiunii de saturaţie şi curentului de colector în poziţia închis. Tensiunea de saturaţie tipică pentru un tranzistor de putere cu siliciu este de circa 1,1 V.

Pentru a utiliza la capacitate maximă tranzistorul fără a-l supraîncărca termic în timpul comutaţiei, trebuie respectată aria de securitate reprezentată în Fig.5.5b. In timpul comutaţiei între cele două stări reprezentate în Fig.5.5a, valorile curentului de colector (I_C) şi tensiunii colector-emitor (U_{CE}) trebuie să aparţină conturului reprezentat în Fig.5.5b. Pragul cel mai mic al timpilor de comutaţie dă o limită dreptunghiulară ariei de securitate.

Pierderile în comutaţie ale unui tranzistor sunt în special datorate evoluţiei cuplului de valori U_{CE}-I_C în timpul trecerii din starea de saturaţie în cea de blocare, Fig.5.6b, [3].

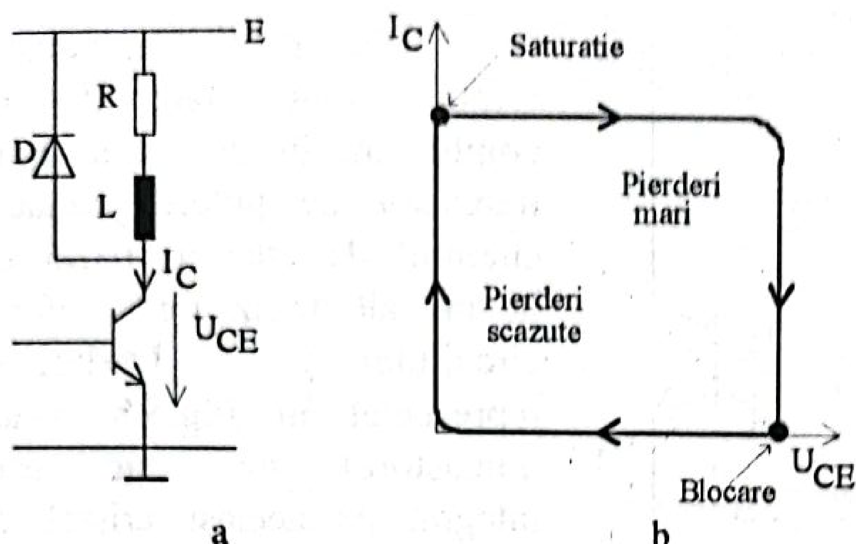


Fig.5.6

Comutația unui circuit inductiv utilizând un tranzistor bipolar: a-schema electrică; b-evoluția cuplului de valori U_{CE}-I_C

Cu ajutorul circuitului inductiv, comandat de un tranzistor bipolar, Fig.5.6a, vom prezenta un exemplu de comutație nedorită. Dacă tranzistorul este blocat și îl trecem în saturație drumul parcurs de cuplul de valori U_{CE}-I_C urmează axele, deci pierderile sunt foarte mici. Dacă tranzistorul este saturat și se comandă blocarea acestuia, dioda D începe să conducă, tensiunea U_{CE} este aproximativ egală cu tensiunea de alimentare E, iar curentul de colector nu este nul instantaneu. Drumul parcurs de cuplul de valori U_{CE}-I_C este în plină zonă a pierderilor mari, Fig.5.6b.

Cu ajutorul rețelei formate dintr-un condendator C, o rezistență R și o diodă D, Fig.5.7a, se poate îmbunătăți comutația tranzistorului. Dacă tranzistorul este saturat dioda D este blocată, iar condensatorul nu influențează funcționarea tranzistorului datorită rezistenței R. In timpul blocării tranzistorului, tensiunea U_{CE} crește lent din cauza condensatorului C și a diodei D. Drumul parcurs de cuplul de valori U_{CE}-I_C trece prin zona pierderilor scăzute, Fig.5.7b.

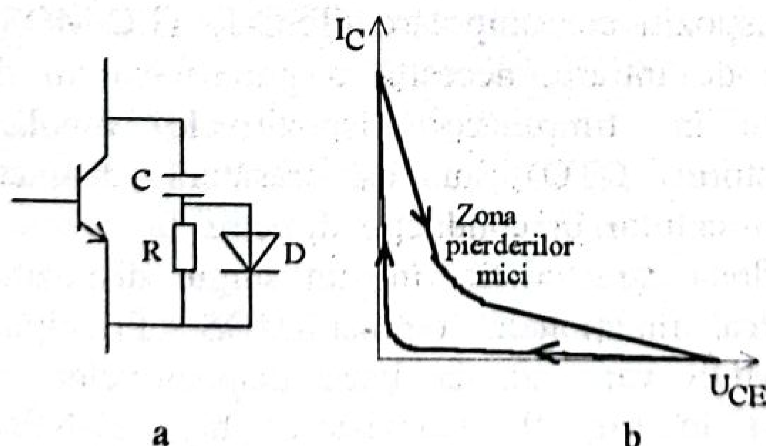


Fig.5.7

Rețea pentru ajutorul comutației: a-schema electrică; b-evoluția cuplului de valori U_{CE}-I_C

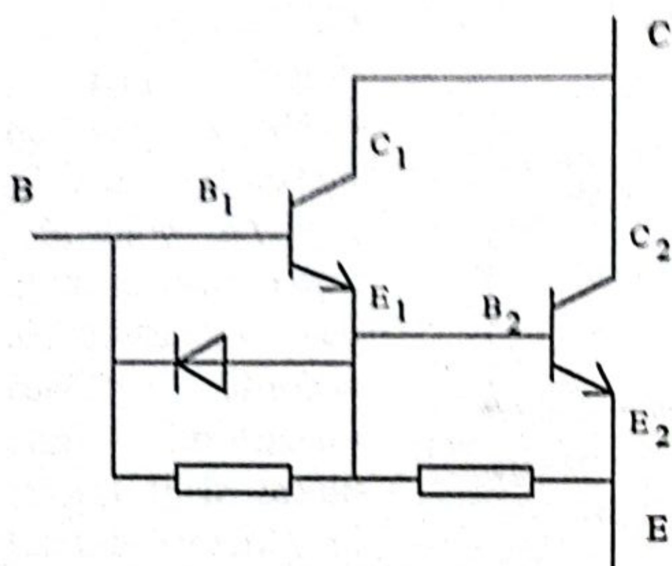


Fig.5.8
Conexiunea Darlington

Se poate îmbunătăţi foarte mult factorul de amplificare în curent al unui tranzistor de putere preluând curentul de atac al bazei de la un alt tranzistor conform circuitului Darlington reprezentat în Fig.5.8. Dacă tranzistorul de atac este integrat pe acelaşi cristal de siliciu, câştigul în curent poate ajunge la valori foarte mari, dar timpul de comutaţie se măreşte.

Tranzistorul bipolar cu grilă izolată-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). In domeniul dispozitivelor semiconductoare de putere având un terminal de comandă (bază, poartă sau grilă) pentru controlul integral (on/off) al proceselor de comutaţie tendinţa dominantă este micşorarea puterii de intrare (de comandă) necesară funcţionării în diferite moduri de lucru simultan cu mărirea densităţii de curent comutate.

Se cunoaşte că dispozitivele unipolare (TEC-J, TEC-MOS), care au o rezistenţă mare de intrare, necesită o putere extrem de redusă pentru comandă, în timp ce dispozitivele bipolare (tranzistorul bipolar, tiristorul GTO) au ca trăsătură distinctă densitatea relativ mare a curentului în conducţie directă.

Imbinarea acestor două caracteristici într-un singur dispozitiv s-a realizat prin integrarea funcţională bipolară-MOS. Principiul integrării funcţionale Bi-MOS care stă la baza dispozitivelor cu poartă izolată este ilustrat în Fig.5.9. Tranzistorul bipolar NPN, respectiv MOS cu canal N, conectate în configuraţie Darlington sunt realizate pe aceeaşi structură, Fig.5.9a. O tensiune pozitivă de valoare suficient de mare aplicată pe grilă deschide tranzistorul MOS care asigură curentul de bază al tranzistorului bipolar şi trecerea structurii Bi-MOS în starea on. Atunci când tensiunea grilă-sursă (V_{GS}) a tranzistorului TEC-MOS este zero prin structura

acestui dispozitiv nu trece curent deci, baza tranzistorului bipolar este în gol şi în consecinţă structura Bi-MOS se află în starea off.

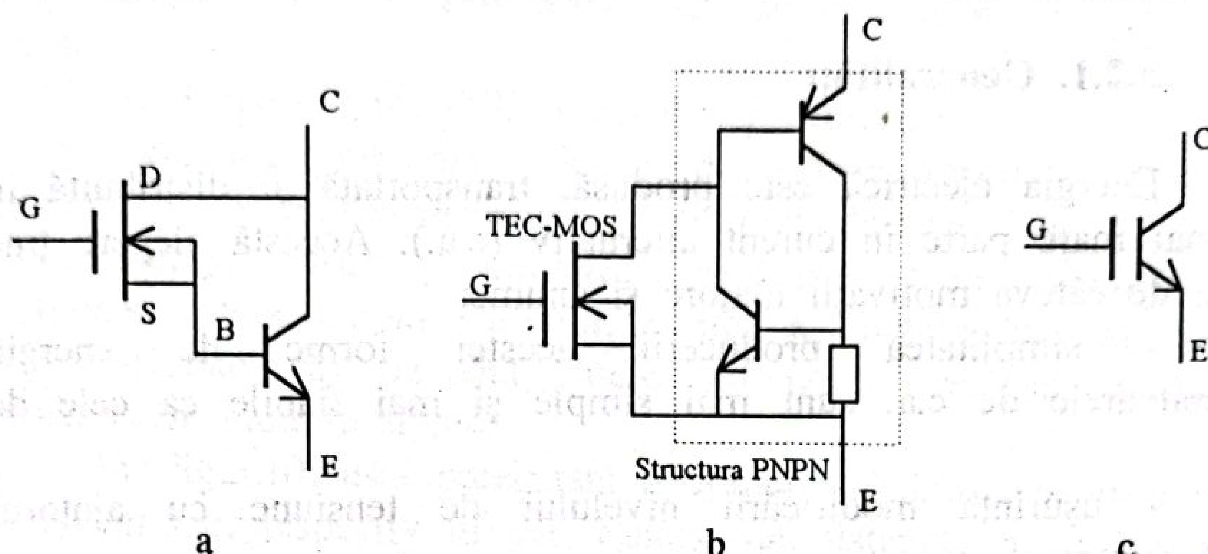


Fig.5.9

Tranzistor bipolar cu grilă izolată: a-structura Bi-MOS; b-structura IGBT; c-simbol grafic.

Acest tip de integrare funcţională (Bi-MOS) a fost dezvoltat şi în direcţia structurii PNPN obţinându-se un dispozitiv ce poartă denumirea de tranzistor bipolar cu poartă izolată (IGBT), Fig.5.9b.

Avantajul esenţial al dispozitivelor Bi-MOS, respectiv IGBT îl constituie puterea practic nulă consumată pe poartă în timpul funcţionării şi căderea de tensiune redusă în starea de conducţie.

Tiristorul controlat MOS-MCT (MOS Controlled Thyristor), este un dispozitiv semiconductor de putere, de ultimă oră, care permite obţinerea unei densităţi de curent de 2,5 ori mai mare ca cea a unui IGBT, [9]. MCT-ul este un dispozitiv a cărui structură poate fi considerată ca fiind realizată dintr-un tiristor la care a fost adăugat un tranzistor MOS cu canal N pentru a asigura amorsarea şi un tranzistor cu canal P pantru a realiza blocarea. Analogia MCT-ului cu un tiristor rămâne totuşi limitată deoarece datorită integrării structurii MOS, respectiv bipolare pe acelaşi cip funcţionarea lui este asemănătoare cu a unui IGBT.

Densitatea de curent mare, 100 A/cm^2, permite în cazul MCT-ului de a se obţine un raport între puterea comutată şi suprafaţa de siliciu, de valori foarte ridicate.

5.2. Instalaţii electrice de curent continuu la înaltă tensiune

5.2.1. Generalităţi

Energia electrică este produsă, transportată şi distribuită în cea mai mare parte în curent alternativ (c.a.). Această alegere ţine seama de câteva motivaţii majore şi anume:

- simplitatea producerii acestei forme de energie (generatoarele de c.a. sunt mai simple şi mai fiabile ca cele de c.c.);
- uşurinţa modificării nivelului de tensiune cu ajutorul transformatoarelor;
- posibilitatea de întrerupere mai uşoară a curentului datorită anulării sale naturale la trecerea prin zero.

Totodată, controlul transferurilor de energie în c.a. în cazul reţelelor intens buclate prezintă probleme din ce în ce mai greu de rezolvat, cum ar fi:

- repartiţia tranzitelor de energie pe liniile unei reţele buclate se face după legi fizice şi nu întotdeauna economic;
- consumul de putere reactivă trebuie să fie compensat pentru a limita căderile de tensiune;
- reglajul frecvenţei şi a fazei tensiunilor produse de generatoarele interconectate trebuie să fie coordonat.

In alte cazuri, din motive de valorificare a resurselor naturale disponibile, centrele de producţie şi consum sunt îndepărtate şi deci distanţele de transport a energiei electrice cresc şi apare necesitatea compensării puterii reactive, iar menţinerea stabilităţii devine dificil de asigurat.

Consideraţiile prezentate permit precizarea mai concrectă a domeniilor de aplicaţie ale curentului continuu. Aceste domenii privesc în mod deosebit transportul energiei electrice. Totuşi, trebuie subliniat că utilizarea c.c. este scumpă şi că prezintă interes economic doar în câteva cazuri particulare de transport a energiei pe distanţe mari şi între sisteme energetice care prezintă caracteristici de incompatibilitate.

Un prim domeniu de aplicaţie este cel al legăturilor electrice subterane sau submarine de lungime mare în c.c. care permit:

- reducerea apreciabilă a costurilor cablurilor;
- evitarea problemelor legate de puterea reactivă vehiculată care duc la supradimensionarea cablurilor de c.a., iar în cazul liniilor lungi apare necesitatea montării unor echipamente intermediare de-a lungul cablului, pentru a absorbi această putere reactivă (capacitivă) parazită, lucru dificil de realizat dacă nu imposibil, în anumite situaţii.

In Fig.5.10, este prezentată o comparaţie între costurile unei legături în c.c. respectiv în c.a. funcţie de distanţă, unde: SA este costul staţiei în c.a., SC-costul staţiei în c.c., LA-costul liniei în c.a., LC-costul liniei în c.c., d- distanţa de la care este recomandată alegerea transportului în c.c., 1 şi 2- costul total al investiţiilor în c.c. respectiv c.a.

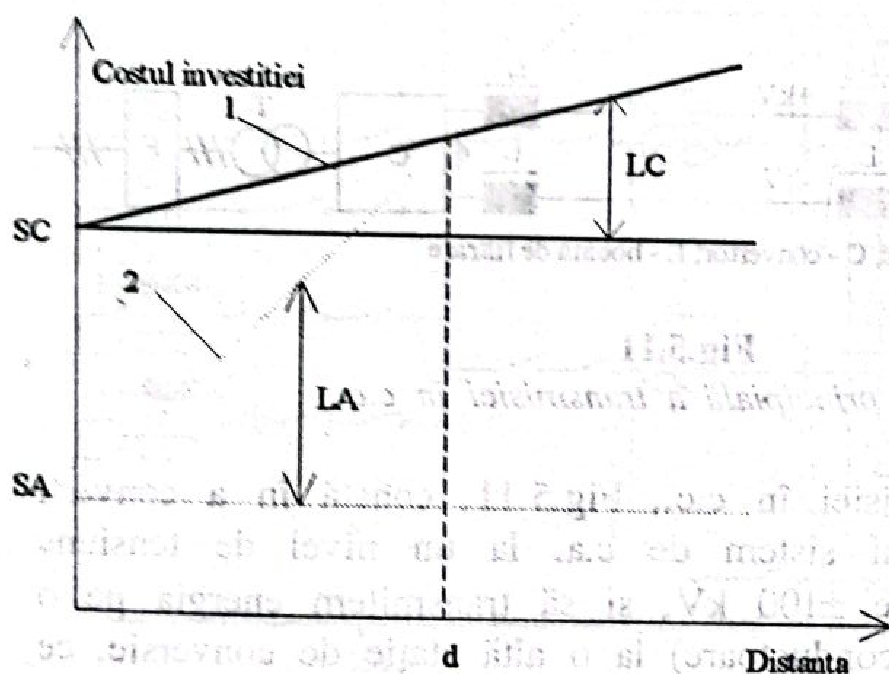


Fig.5.10
Dependenţa costului investiţiei de lungimea liniei în c.a. respectiv c.c.

Se observă că o staţie de conversie de la extremităţile unei linii de c.c. costă de aproximativ 5 ... 10 ori mai mult decât o staţie de c.a., iar distanţele de la care devine convenabilă din punct de vedere economic alegerea soluţiei de transport în c.c. este de aproximativ 40 km pentru linii în cablu şi 600 km pentru linii aeriene, [8].

Alte posibilităţi de utilizare a c.c. la înaltă tensiune sunt la realizarea interconexiunilor internaţionale dintre diverse sisteme energetice naţionale respectiv între sisteme cu frecvenţe de

funcţionare diferite (50 Hz şi 60Hz), existând interconexiuni de acest tip în Japonia (Sakuma şi Shiu-Shinano) şi în Brazilia (Itaipu).

In prezent, există pe plan mondial peste 50 de instalaţii în c.c. la înaltă tensiune ce se găsesc în exploatare, având tensiuni cuprinse între ±42 kV ... ±600 kV, respectiv o putere cumulată de 40 GW, cu o putere instalată în convertoare de aproximativ 80 GW, [1].

5.2.2. Staţii de conversie c.a. - c.c.

O legătură în c.c. este constituită dintr-o linie de c.c. ce conectează între ele cel puţin două reţele de c.a. prin intermediul unor staţii de conversie.

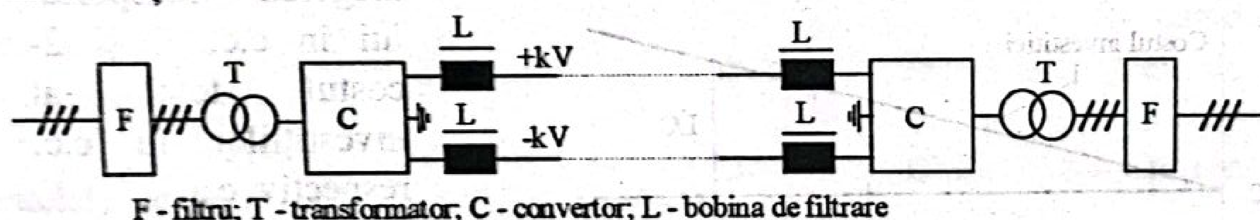


Fig.5.11

Schema principială a transmisiei în c.c.

Pricipiul transmisiei în c.c., Fig.5.11, constă în a converti (redresa) tensiunea unui sistem de c.a. la un nivel de tensiune continuă, să spunem de ±100 kV, şi să transmitem energia pe o linie cu două cabluri (conductoare) la o altă staţie de conversie, ce funcţionează ca invertor şi alimentează un alt sistem de c.a.

Acest transfer se efectuează cu un randament aproape de unitate dar cu apariţia unor inconveniente cum ar fi:

- un consum suplimentar de putere reactivă care trebuie compensat, în parte, la faţa locului;
- generarea de armonici, care trebuie să fie filtrate pentru a nu pătrunde în reţeaua de c.a. cu o amplitudine prea mare.

Puterea poate circula în ambele sensuri deoarece fiecare convertor (C) poate funcţiona atât ca redresor cât şi ca invertor.

Schema generală a unei staţii de conversie se poate vedea în Fig.5.12. Schema cuprinde: o parte de c.a., unităţile de conversie (UC) şi o parte de c.c.

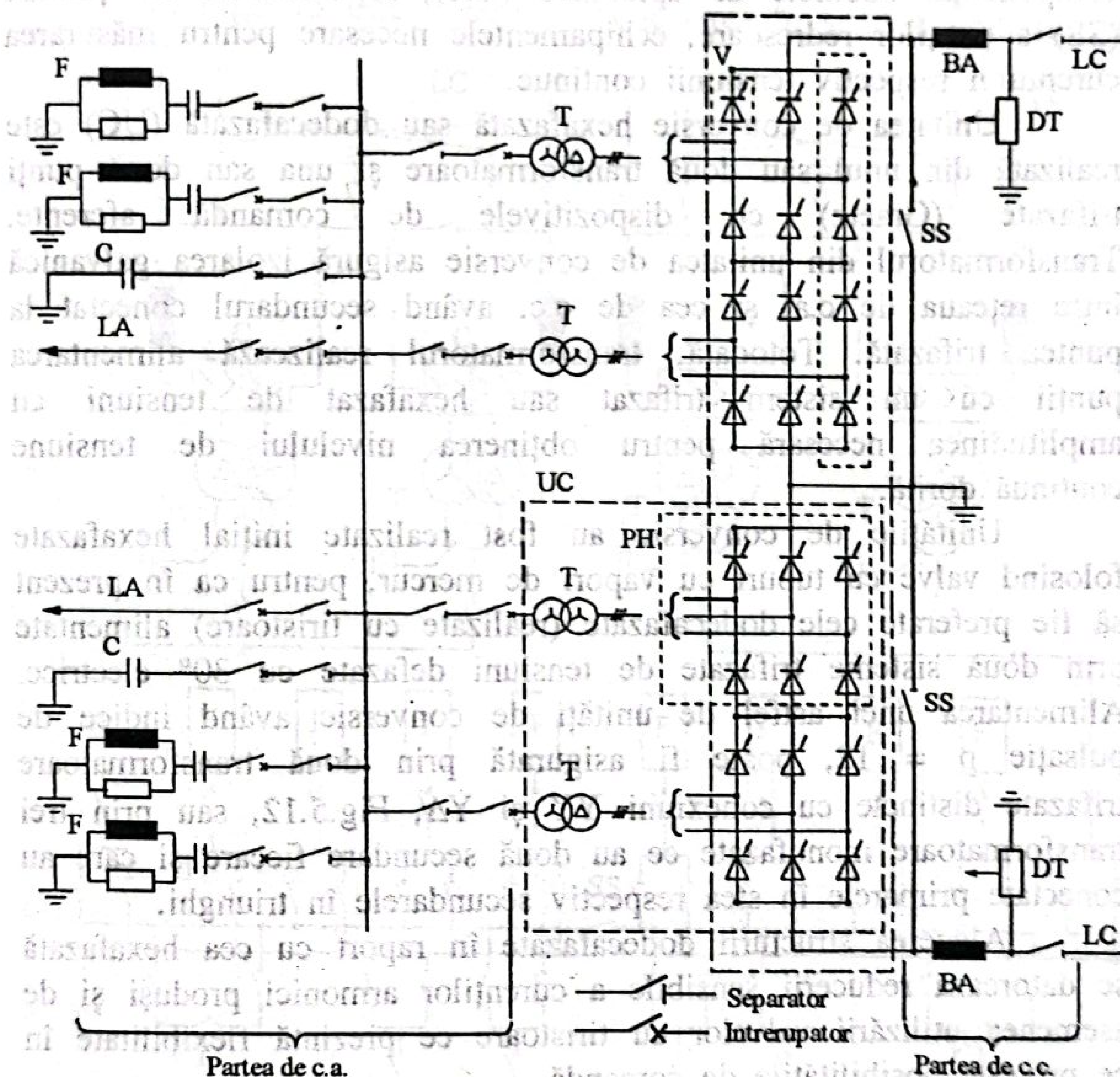


Fig.5.12

Schema generală a unei staţii de conversie

Partea de c.a. este realizată cu un sistem de bare şi celule de linie şi de transformator care pot realiza diferite combinaţii de conexiuni între liniile de c.a. (LA) şi unităţile de conversie (UC). La sistemul de bare de pe partea de c.a. se află conectate celulele liniilor de c.a. (LA), filtrele de armonici (F), bateriile de

condensatoare pentru compensarea puterii reactive (C) și celulele de transformator.

Partea de c.c. se află după unitățile de conversie și are în componență: bobinele de aplatizare (BA), separatoarele de șuntare (SS) a punților redresoare, echipamentele necesare pentru măsurarea curentului respectiv tensiunii continue.

Unitatea de conversie hexafazată sau dodecafazată (UC) este realizată din unul sau două transformatoare și una sau două punți trifazate (Graetz) cu dispozitivele de comandă aferente. Transformatorul din unitatea de conversie asigură izolarea galvanică între rețeaua de c.a. și cea de c.c. având secundarul conectat la puntea trifazată. Totodată, transformatorul realizează alimentarea punții cu un sistem trifazat sau hexafazat de tensiuni cu amplitudinea necesară pentru obținerea nivelului de tensiune continuă dorită.

Unitățile de conversie au fost realizate inițial hexafazate folosind valve cu tuburi cu vapori de mercur, pentru ca în prezent să fie preferate cele dodecafazate (realizate cu tiristoare) alimentate prin două sisteme trifazate de tensiuni defazate cu 30° electrice. Alimentarea unei astfel de unități de conversie având indice de pulsație $p = 12$, poate fi asigurată prin două transformatoare trifazate distincte cu conexiuni YY și YΔ, Fig.5.12, sau prin trei transformatoare monofazate ce au două secundare fiecare și care au conectate primarele în stea respectiv secundarele în triunghi.

Alegerea structurii dodecafazate în raport cu cea hexafazată se datorează reducerii sensibile a curenților armonici produși și de asemenea utilizării valvelor cu tiristoare ce prezintă flexibilitate în ce privește posibilitățile de comandă.

O unitate de conversie dodecafazată, independent de transformatoarele T este constituită din două punți hexafazate PH având fiecare câte trei brațe constituite din două valve, V, pe fiecare braț. Valvele V sunt realizate din înserierea mai multor tiristoare.

Pentru cazul în care linia de c.c; asigură interconexiunea dintre două sisteme electroenergetice, iar tranzitul de putere prin linie este superior rezervei disponibile rapid din sistemul receptor este necesară adoptarea unei soluții optime în ce privește schema

stației de conversie. Există două posibilități care pot rezolva această problemă și anume: conectarea în serie sau în paralel a unităților de conversie.

In Fig.5.13 este prezentată conectarea în serie a unităților de

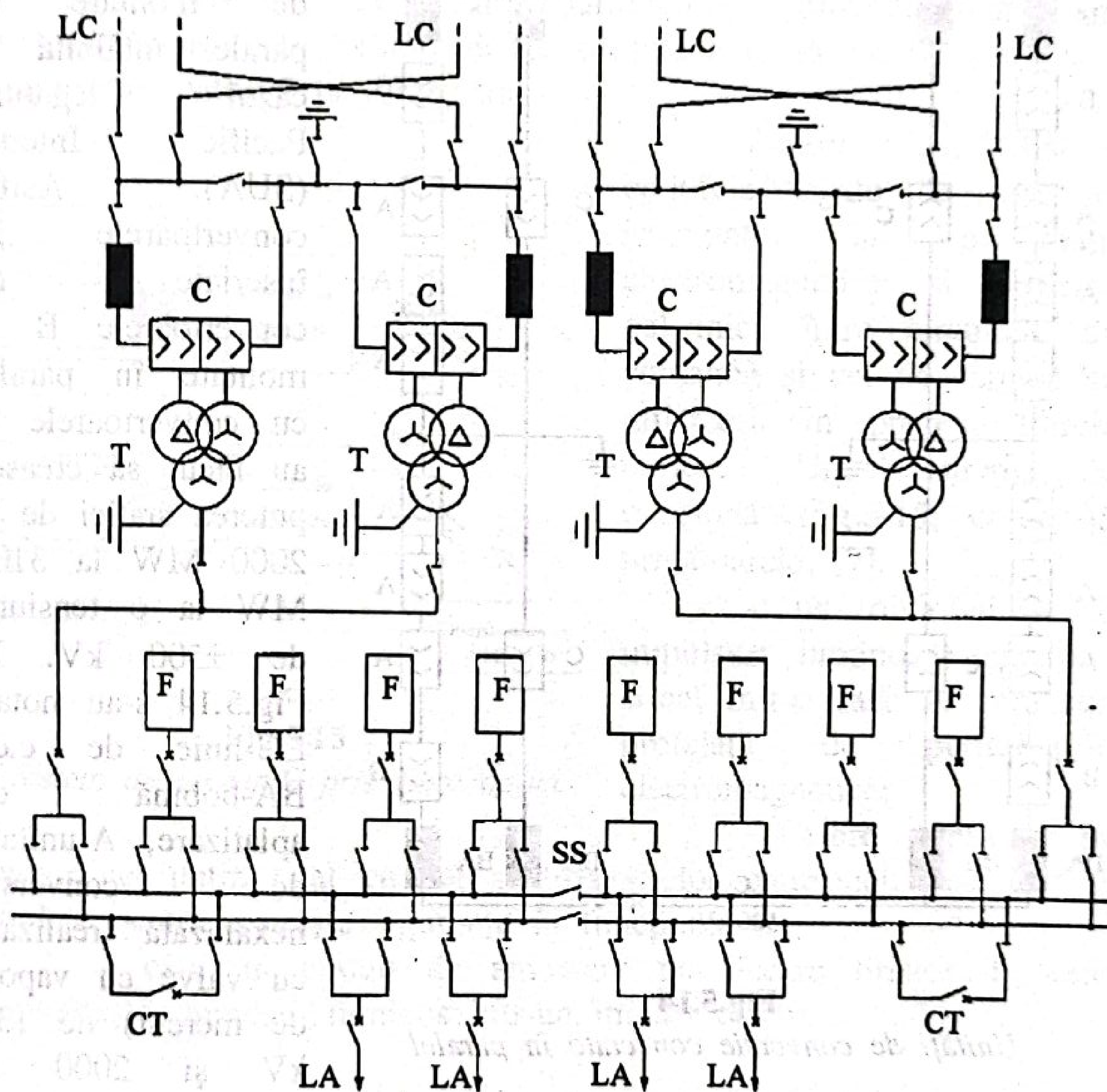


Fig.5.13
Unități de conversie conectate în serie

conversie în cazul stației Mandarius, stație ce reprezintă partea franceză a interconexiunii dintre Franța și Anglia realizată prin cabluri submarine de 2000 MW, unde s-au notat: C-convertor de 500 MW la o tensiune de ±270 kV, F-filtru, LC-linie de c.c., LA-

linie de c.a., T-transformator trifazat de 618 MVA, CT-cuplă transversală, SS-separator de secționare.

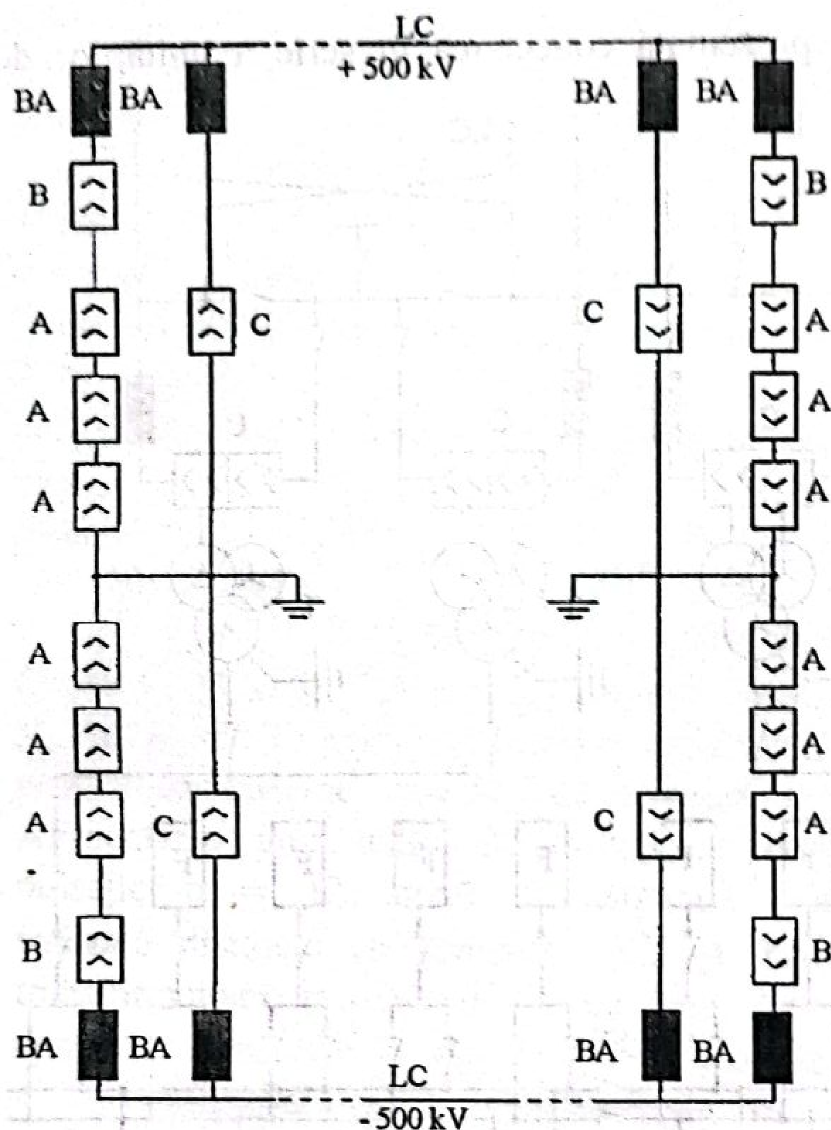


Fig.5.14

Unități de conversie conectate în paralel

In Fig.5.14 se arată un exemplu de montare în paralel întâlnită în cazul legăturii Pacific Intertie (SUA). Astfel convertoarele A înseriate cu convertoarele B și montate în paralel cu convertoarele C au făcut să crească puterea stației de la 2000 MW la 3100 MW la o tensiune de ±500 kV. In Fig.5.14 s-au notat: LC-linie de c.c., BA-bobină de aplatizare, A-unitate de conversie hexafazată (realizată cu valve cu vapori de mercur) de 133 kV și 2000 A (montată în 1970); B unitate de conversie hexafazată (realizată cu valve cu tiristoare) de 100 kV și 2000 A (montată în 1985); C unitate de conversie dodecafazată (cu tiristare) de 500 kV și 1100 A (montată în 1989).

Pentru diminuarea pierderilor de transport, conversia se efectuează la câțiva zeci de kV în cazul stațiilor spate în spate, respectiv câteva sute de kV în cazul transportului pe distanțe mari. Apare deci necesitatea conectării în serie a mai multor tiristoare. Trebuie deci subliniat ca valorile mari de 3500...4000 A ale

intensităţilor curentului ce pot fi suportate de pastilele redresoare cu diametrul de 150 mm, nu justifică, în general, conectarea de tiristoare în paralel.

Conectarea în serie a tiristoarelor impune condiţii deosebite în ceea ce priveşte funcţionarea circuitelor de comandă. Amorsarea tiristoarelor înseriate trebuie să fie simultană şi să nu fie provocată intempestiv datorită perturbaţiilor.

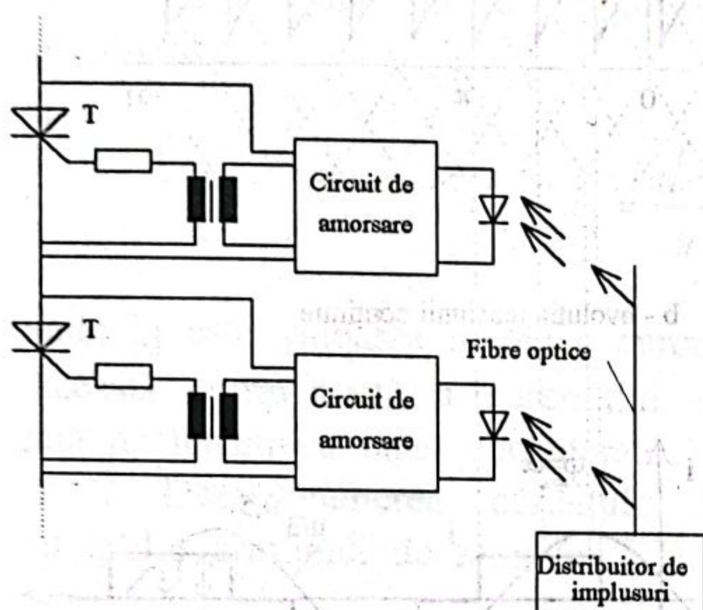


Fig.5.15
Sistem de comandă prin fibre optice

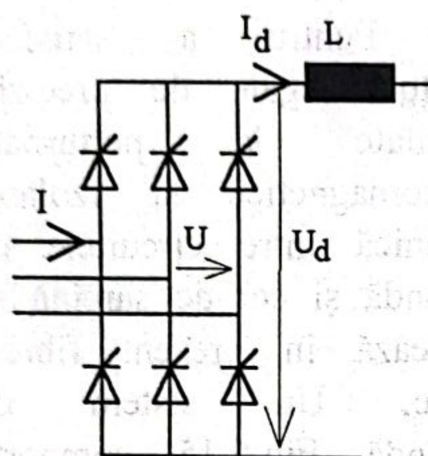
Pentru a satisface cerinţele legate de precizie, imunitate la perturbaţii electromagnetice şi izolarea galvanică între circuitele de comandă şi cel de sarcină se utilizează în prezent fibrele optice. Un sistem de comandă, Fig.5.15, comportă următoarele, [7]:

- un distribuitor de impulsuri luminoase sincrone situat într-o sală de comandă protejată de perturbaţiile electromagnetice;
- fibre optice, în număr cel puţin egal cu cel al tiristoarelor comandate (ele pot fi dublate pentru a creşte siguranţa în funcţionare);
- câte un circuit de amorsare pe fiecare tiristor T, care converteşte impulsul luminos într-un impuls electric.

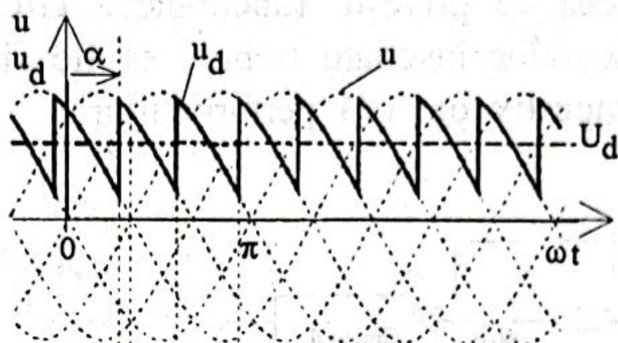
5.2.3. Puntea trifazată a unităţii de conversie

Puntea trifazată (Graetz), Fig.5.16, a unităţii de conversie este un convertor cu indice de pulsaţie 6, [1], [11]. La ieşire se obţine o tensiune redresată a cărei valoare medie U_d, Fig.5.16b, se exprimă funcţie de tensiunea alternativă efectivă de linie a sursei, U şi de unghiul de întârziere la amorsarea valvelor, α, cu relaţia:

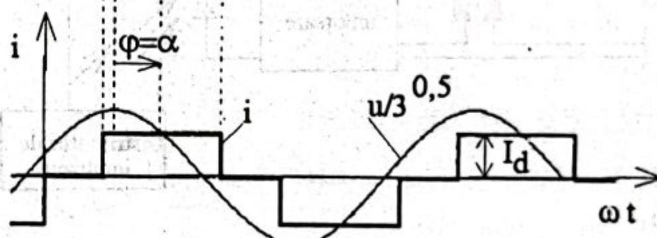
$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \cdot \cos\alpha. \qquad (5.1)$$



a - schema electrica



b - evolutia tensiunii continue



c - evolutia curentului alternativ

Fig.5.16

Puntea trifazată: funcționarea ideală

Această relație se obține în două condiții simplificatoare și anume:

- inductanțe nule pe partea de c.a., permițând comutația instantanee a curentului de la un tiristor la altul;

- o inductanță infinită pe partea de c.c. conducând la o ondulație nulă și o aplatizare perfectă a curentului.

Datorită prezenței valvelor unidirecționale, curentul continuu circulă întotdeauna în același sens, deci în funcție de valoarea unghiului α, se determină sensul tranzitului de putere:

- pentru valori ale lui α cuprinse între 0 și 90°, puntea transmite putere de la rețeaua de c.a. spre cea de c.c., deci funcționează ca redresor;

- pentru valori între 90° şi o limită inferioară apropiată de 180°, γ (unghiul γ este denumit unghi de stingere sau de gardă şi evită fenomenul de ratare a comutaţiei), transferul de putere este în sens invers, deci puntea funcţionează ca invertor.

Curentul i are o formă perfect dreptunghiulară numită 2/3-1/3, Fig.5.16c; 2/3 dintr-o perioadă curentul este diferit de zero, iar 1/3 este nul. Descompunerea în serie Fourier a curentului de pe fiecare fază pune în evidenţă o componentă fundamentală de amplitudine:

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d, \tag{5.2}$$

unde I_d este valoarea medie a curentului continuu.
Această componentă a curentului este în întârziere cu unghiul α faţă de tensiunea fazei considerate.

Descompunerea curentului arată, de asemenea, prezenţa curenţilor armonici de rang h:

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d, \tag{5.3}$$

unde h este rangul armonicii: $h = pk \pm 1$, $k \in N$ (p, indicele de pulsaţie).
Valoarea efectivă a curentului de linie este:

$$I = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d, \tag{5.4}$$

Se deduce astfel factorul de distorsiune a curentului respectiv a puterii cu relaţiile:

$$\frac{I_1}{I} = \frac{3}{\pi}, \qquad K = \frac{3}{\pi} \cdot \cos\alpha. \tag{5.5}$$

Reglajul tensiunii continue provoacă astfel un consum de putere reactivă cu un factor de defazaj (numit factor de deplasare, $\cos\varphi$) egal cu $\cos\alpha$.

In realitate, sursa de c.a. fiind întotdeauna mai mult sau mai puţin inductivă, comutaţiile nu mai sunt instantanee, iar durata lor corespunde cu unghiul de comutaţie ν, Fig.5.17 (unde: u_1 şi u_2 tensiunile instantanee între faze).

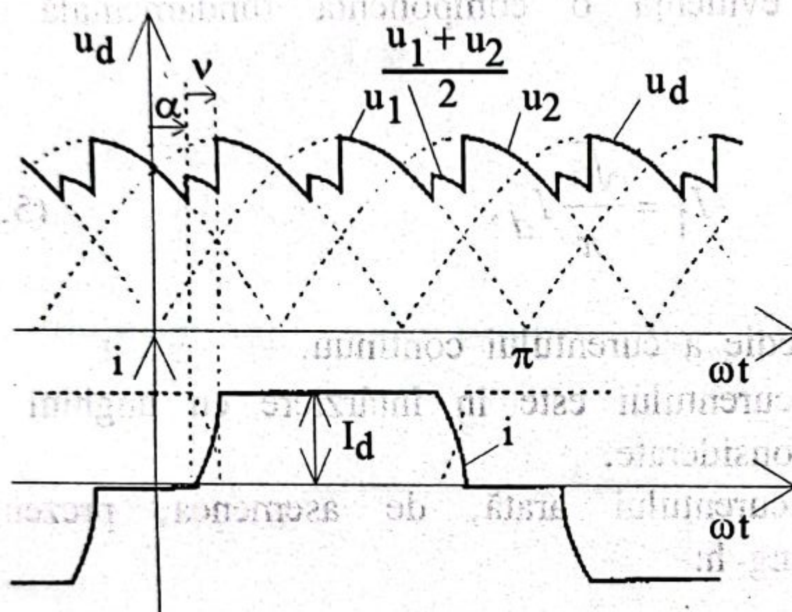


Fig.5.17

Influenţa unghiului de comutaţie

Printre efectele care le implică prezenţa unghiului de comutaţie amintim reducerea tensiunii continue medii redresate, respectiv a factorului de deplasare ($\cos\varphi$) ceea ce duce la o creştere a puterii reactive absorbite de punte de la reţea.

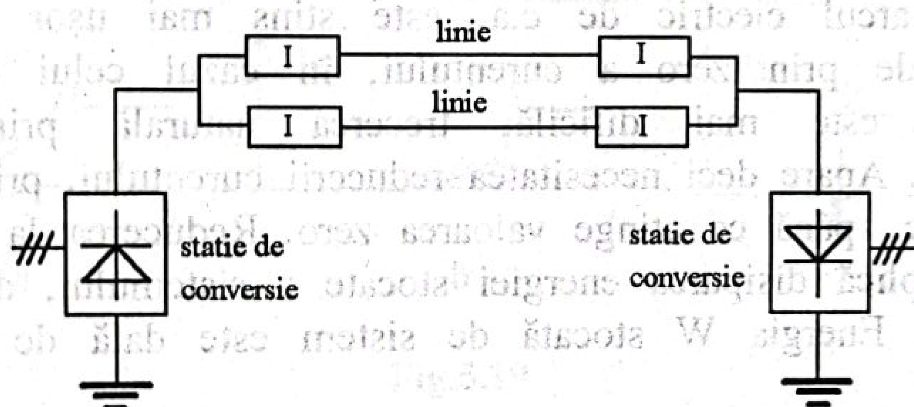
Utilizarea de tiristoare cu blocare pe poartă (GTO) sau de tiristoare MCT (Mos Controlled Thyristor) în construcţia convertoarelor vor duce la: posibilitatea de a regla independent schimbul de putere activă şi reactivă cu reţeaua de c.a., posibilitatea de a controla armonicile generate de convertor.

Extinderea utilizării legăturilor în c.c. este limitată chiar şi în cazul în care transportul în c.c. este mai economic decât transportul în c.a. datorită siguranţei reduse în funcţionare a convertoarelor şi datorită faptului că funcţionarea convertoarelor impune un consum important de putere reactivă, având ordinul de mărime egal cu puterea activă.

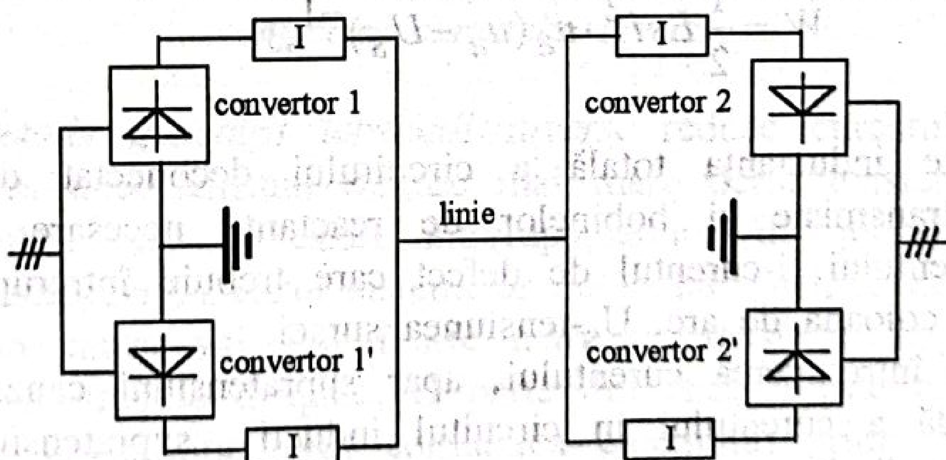
5.3. Comutaţia de putere în curent continuu la înaltă tensiune

5.3.1. Generalităţi

In sistemele existente de transmisie a energiei la înaltă tensiune în curent continuu prevăzute cu două staţii terminale de conversie a energiei, se poate funcţiona fără întrerupătoare de c.c. deoarece defectele de pe liniile de transmisie pot fi controlate cu ajutorul convertoarelor şi a întrerupătoarelor de pe partea de c.a. a staţiilor de conversie. Cu toate acestea, întrerupătoarele de înaltă



a



b

Fig.5.18

Sisteme de transmisie în c.c. care necesită prezenţa întrerupătoarelor de c.c.

tensiune de c.c. pot fi utilizate pentru creşterea performanţelor sistemului de transmisie, când avem linii conectate în paralel,

Fig.5.18a, sau convertoare montate în paralel ce alimentează aceeaşi linie, Fig.5.18b.

Un sistem care conectează trei sau mai multe staţii de conversie prin linii de înaltă tensiune de c.c. este denumit sistem de transmisie multiterminal. Intr-un sistem multiterminal este necesară prezenţa întrerupătoarelor de c.c. pentru a asigura o fiabilitate ridicată şi un anumit grad de libertate în funcţionarea acestuia. Astfel, întrerupătoarele izolează secţiuni din instalaţie pastrând linii care transmit în continuare energie, deconectează linii defecte cu perturbaţii minime în sistem şi izolează staţia terminală sau convertorul defect.

Dacă arcul electric de c.a. este stins mai uşor datorită trecerii naturale prin zero a curentului, în cazul celui de c.c. stingerea sa este mai dificilă, trecerea naturală prin zero nemaiexistând. Apare deci necesitatea reducerii curentului, prin arcul electric de c.c., până ce atinge valoarea zero. Reducerea la zero a curentului implică disiparea energiei stocate a sistemului, de către arcul electric. Energia W stocată de sistem este dată de relaţia, [17]:

$$W = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \cdot u_a (u_a - U_s)^{-1}, \qquad (5.6)$$

unde: L este inductanţa totală a circuitului deconectat datorată liniilor de transmisie şi bobinelor de reactanţă necesare pentru netezirea curentului, i-curentul de defect care trebuie întrerupt, u_a-tensiunea pe coloana de arc, U_s-tensiunea sursei.

După întreruperea curentului, apar supratensiuni cauzate de variaţia rapidă a curentului în circuitul inductiv, supratensiuni ce trebuie să fie limitate pentru a nu solicita izolaţia echipamentelor electrice.

Se desprind următoarele probleme în cazul întreruperii în curent continuu: crearea unui punct de zero a curentului continuu, disiparea energiei înmagazinate în inductanţele circuitului, limitarea supratensiunilor datorate întreruperii curentului. Disiparea energiei şi limitarea supratensiunilor sunt realizate prin utilizarea descărcătoarelor cu oxizi de zinc.

5.3.2. Metode de comutație utilizate în c.c.

Metodele propuse pentru întreruperea unui c.c., bazate pe crearea unui punct de zero sunt: metoda generării tensiunii inverse; metoda oscilației curentului divergent; metoda injectării curentului invers. In Fig5.19, sunt prezentate formele de undă tipice ale curentului și tensiunii pe durata unei întreruperi în c.c., în cazul celor trei metode.

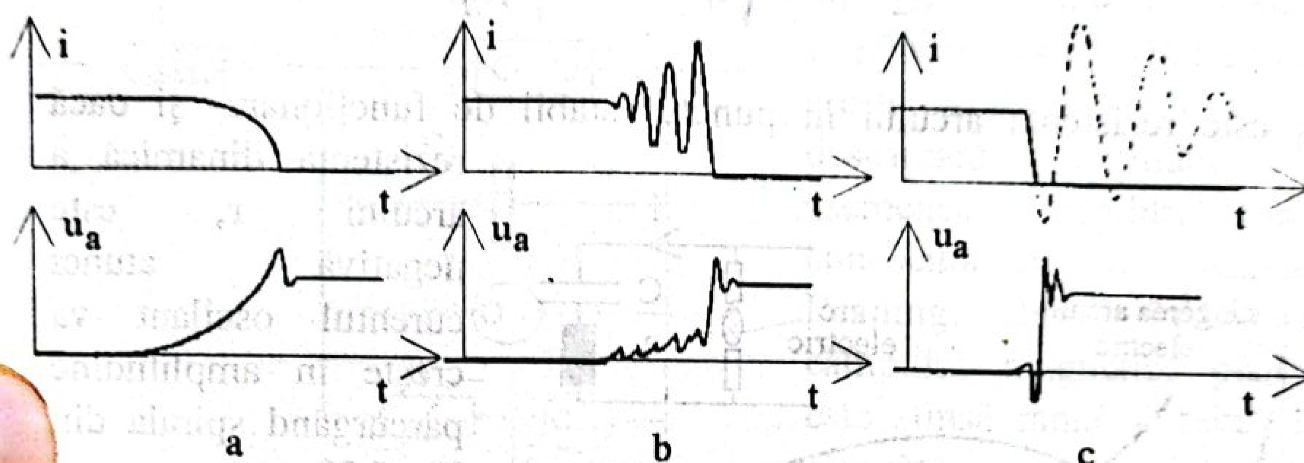


Fig.5.19

Forme de undă tipice la deconectarea unui c.c. prin: a-metoda generării tensiunii inverse; b-metoda oscilației curentului divergent; c-metoda injectării curentului invers.

Metoda generării tensiunii inverse reduce curentul la zero prin crearea unei tensiuni de arc mai mare decât tensiunea sursei de alimentare, ca în cazul întrerupătoarelor de joasă tensiune. Aplicarea metodei în cazul sistemelor de înaltă tensiune de c.c. este dificilă din cauza valorilor foarte mari ale tensiunii de arc și a energiei care trebuie disipate. O parte din energie este disipată, în majoritatea aplicațiilor, prin comutarea curentului printr-un rezistor și/sau condesator și o parte cu ajutorul arcului electric. Această posibilitate de întrerupere a curentului poartă denumirea de metoda comutării curentului.

Metoda oscilației curentului divergent crează un punct de zero prin amplificarea amplitudinii unei oscilații de curent de înaltă frecvență. Metoda utilizează caracteristica negativă a arcului electric, Fig.5.20, care determină un curent de oscilație crescător în circuitul format din arcul electric, condensarorul C și inductanța L. O

creştere oricât de mică a tensiunii de arc determină o creştere a curentului prin condensator rezultând o scădere corespunzătoare a curentului prin arc, care induce o creştere suplimentară de tensiune datorită caracteristicii negative a arcului. Analiza stabilităţii arată că, dacă constanta de timp a arcului T_a este mai mică decât o valoare critică T_c, [17]:

$$T_a < T_c = -\frac{1}{2} r \cdot C + \sqrt{\frac{1}{4} r^2 \cdot C^2 - \frac{r}{R_a} L \cdot C}\,, \qquad (5.7)$$

(R_a este rezistenţa arcului în punctul stabil de funcţionare) şi dacă rezistenţa dinamică a arcului r, este negativă atunci curentul oscilant va creşte în amplitudine parcurgând spirala din Fig.5.20.

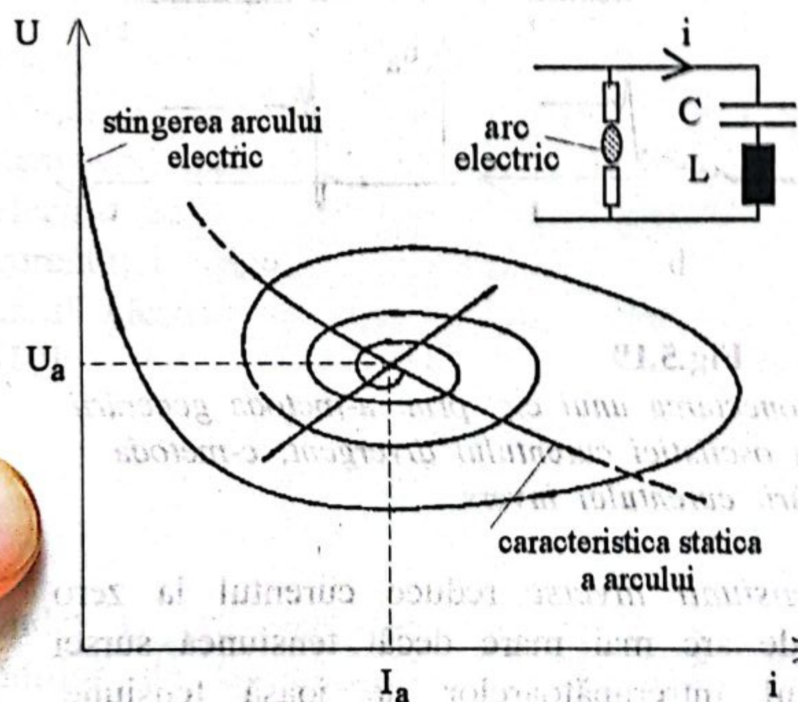


Fig.5.20
Instabilitatea arcului electric

Intrerupătoarele cu ulei, aer, hexafluorură de sulf sau vid de c.a. pot fi utilizate pentru comutaţie în acest caz, dar ele trebuie modificate pentru a minimiza condensatorul din paralel. Această metodă este considerată ca făcând parte din cadrul metodei comutării curentului.

Metoda injectării curentului invers crează un punct de zero prin suprapunerea unui curent invers de înaltă frecvenţă peste curentul continuu, prin descărcarea unui condensator, încărcat în prealabil. Intrerupătoarele convenţionale de c.a. pot fi folosite pentru comutaţia circuitelor în acest caz, dar configuraţia circuitului auxiliar tinde să fie mai complicată decât în cazul altor metode.

5.3.3. Scheme de comutaţie în curent continuu

In tuburile de descărcare la presiune joasă este dificil de a menţine o descărcare la o presiune mai mică decât minimul Paschen. Aplicând un câmp magnetic în zona dintre electrozii unui tub de descărcare, efectul câmpului este similar cu creşterea presiunii. O descărcare obţinută în asemenea condiţii este cunoscută ca o descărcare Penning. Prin înlăturarea câmpului magnetic, plasma este stinsă rapid şi tubul îşi recapătă rigiditatea dielectrică.

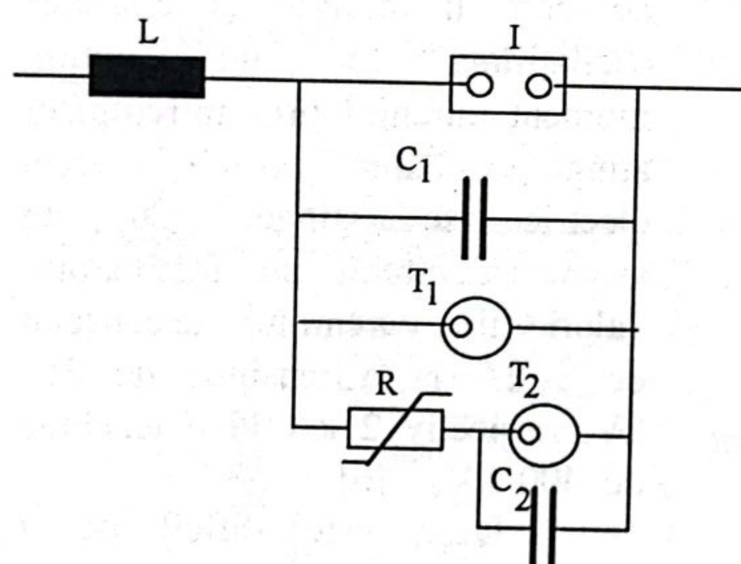


Fig.5.21
Configuraţie de comutaţie cu tuburi Penning

In Fig.5.21 este prezentat un circuit de comutaţie utilizând tuburi de descărcare Penning, [6]. In poziţia închis curentul circulă prin întrerupătorul I (închis), tuburile de descărcare T_1 şi T_2 nefiind amorsate. In debutul operaţiei de întrerupere, întrerupătorul I este deschis şi tensiunea pe arcul electric care apare, creşte. Prin aplicarea unui câmp magnetic atunci când tensiunea pe arc a atins câteva sute de volţi tubul T_1 amorsează şi curentul de deconectare este comutat de la întrerupătorul I la tubul T_1. După ce mediul electroizolant şi de stingere al arcului electric din întrerupătorul I îşi recapătă rigiditatea dielectrică, câmpul magnetic aplicat tubului T_1 este înlăturat şi astfel descărcarea este stinsă şi curentul întrerupt. Chiar în momentul stingerii lui T_1 este amorsat T_2 şi un rezistor neliniar R este introdus pentru a disipa energia stocată a sistemului. Performanţele atinse de această configuraţie de comutaţie sunt 2 kA curent deconectat la o tensiune de 100 kV, [6].

In Fig.5.22 este reprezentat un circuit de comutaţie care utilizează caracteristica negativă a arcului electric. Comutaţia începe prin deschiderea întrerupătorului I ceea ce duce la apariţia unui arc electric şi a unui curent de oscilaţie de înaltă frecvenţă cu amplitudine crescătoare în circuitul care cuprinde elementele C, L_S, şi arcul electric din întrerupătorul I. Fluctuaţiile neregulate ale arcului electric au un rol deosebit în iniţierea şi creşterea oscilaţiilor. La un anumit moment curentul prin întrerupător atinge valoarea zero şi arcul electric se stinge. Cu un asemenea circuit au fost atinse valori ale curentului deconectat de 8 kA la o tensiune de 250 kV, respectiv 2 kA la o tensiune de 400 kV, [6].

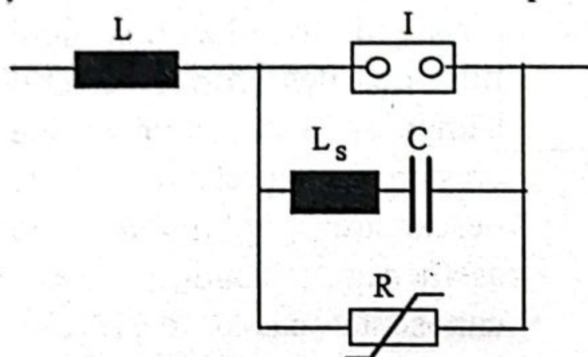


Fig.5.22
Configuraţie utilizând un curent oscilant divergent

Deşi, este dificil de a întrerupe curentul continuu la înaltă tensiune utilizând efectul de limitare al curentului cu ajutorul tensiunii de arc totuşi, printr-o comutaţie pas cu pas este posibilă comutaţia curentului. Un exemplu tipic este arătat în Fig.5.23, care utilizează un întrerupător cu ulei puţin I_1. După deschiderea întrerupătorului I_1, tensiunea pe arcul electric creşte şi va determina amorsarea eclatorului E atunci când ea va atinge o anumită valoare. Curentul din întrerupătorul I_1

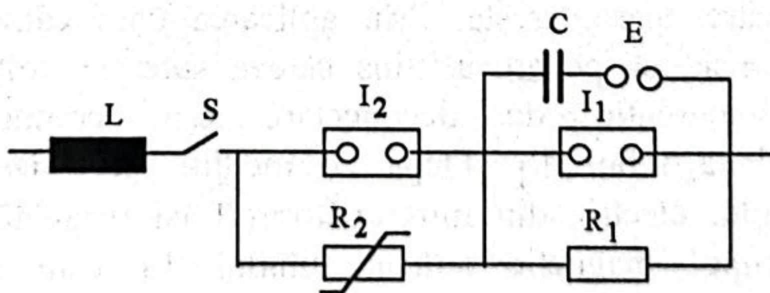


Fig.5.23
Circuit utilizând efectul de limitare al curentului cu ajutorul tensiunii de arc

este comutat o parte prin condensatorul C şi o altă parte prin

rezistorul R_1 determinându-se astfel micşorarea lui. Apoi un al doilea întrerupător (I_2) este deschis şi curentul este comutat prin rezistorul neliniar R_2, care determină reducerea în continuare a curentului. Rezistoarele R_1 şi R_2 disipă energia stocată a sistemului. In final valoarea mică a curentului rezidual este întreruptă cu ajutorul separatorului S, încheindu-se deconectarea circuitului. Prezenta configuraţie poate întrerupe un curent de până la 2,4 kA la o tensiune de 40 kV.

O configuraţie a unui circuit folosind metoda injecţiei curentului invers este prezentată în Fig.5.24. Condensatorul C este încărcat de la tensiunea sistemului prin intermediul rezistoarelor R_1 şi R_2. In momentul deschiderii întrerupătorului cu hexafluorură de sulf I este închis întrerupătorul auxiliar I_1. Astfel se determină o descărcare oscilantă a condensatorului C prin inductanţa L_s şi prin coloanele de arc din întrerupătorul I, cu un curent de înaltă frecvenţă. Intreruperea curentului are loc în momentul când curentul prin arc atinge valoarea zero. Deschiderea întrerupătorului auxiliar I_1 şi închiderea separatorului S asigură încărcarea rapidă a condensatorului C prin rezistorul R_2. O asemenea schemă utilizată în instalaţiile capsulate cu hexafluorură de sulf a fost capabilă să întrerupă curenţi de 8,8 kA la o tensiune de 250 kV, [6].

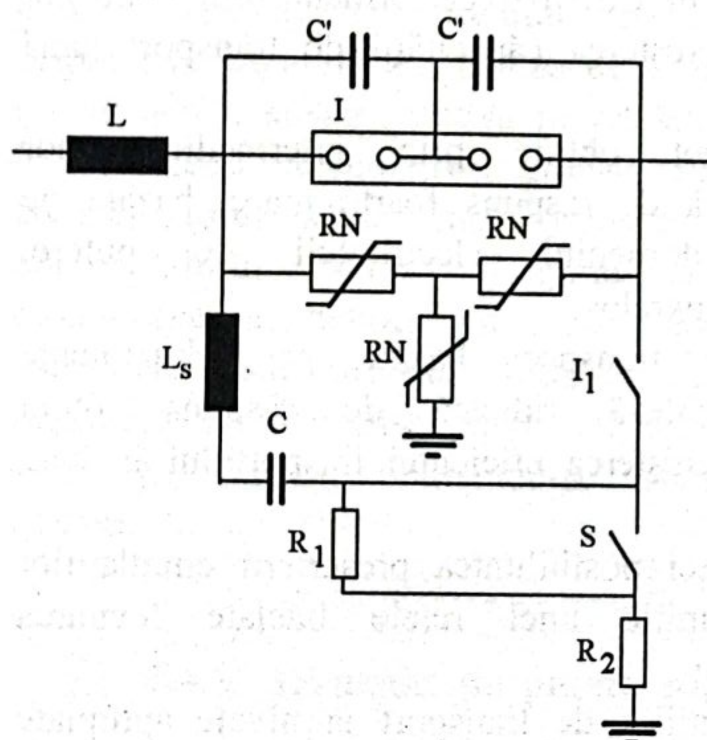


Fig.5.24

Circuit utilizând metoda injectării curentului

5.4. Sisteme flexibile de transmisie în curent alternativ

5.4.1. Generalități

Noțiunea de sistem flexibil de transmisie în c.a. a apărut cu câțiva ani în urmă odată cu demararea de către EPRI (Electric Power Research Institute) a proiectului FACTS (Flexible Alternante Current Transmision Systems). Scopul proiectului este de a realiza un sistem electric de transport în c.a. mai performant prin controlul circulațiilor de puteri și prin creșterea capacității de transport până la limitele admisibile.

Aceste cerințe se pot obține prin intermediul unor dispozitive de control cu viteză de răspuns foarte mare, bazate pe progresele înregistrate în domeniul electronicii de putere, microelectronicii și microprocesoarelor.

Sistemele flexibile de transport bazate pe echipamente electronice de putere cu viteză ridicată de răspuns, oferă următoarele posibilități pentru creșterea eficienței trasportului în c.a., [4], [14], [15]:

- controlul puterii și deci posibilitatea prescrierii circulațiilor (tranzitelor) de puteri pe liniile unei rețele buclate (evitarea circulațiilor de putere în buclă);
- siguranța încărcării liniilor de transport la nivele apropiate de limitele termice;
- prevenirea ieșirii din funcțiune, în cascadă, a instalațiilor prin limitarea efectelor incidentelor;
- creșterea capacității de transport în sistemele controlate, astfel încât rezerva de putere care de obicei este de 18% se poate reduce la 15% sau chiar mai puțin;
- atenuarea oscilațiilor în sistemele de putere care pot deteriora echipamentul și limita capacitatea de transport.

Intr-o rețea electrică buclată repartiția puterii active între diverse centrale electrice și circulațiile spre centrele de consum sunt făcute după legi fizice și nu întotdeauna economic. Puterea reactivă influențează la rândul ei repartiția puterii active prin modificarea nivelelor de tensiuni, deoarece liniile de transport sunt producătoare

sau consumatoare de putere reactivă în funcție de gradul lor de încărcare.

Pentru reglajul circulațiilor de putere activă și reactivă într-o rețea de c.a. există, în prezent, următoarele posibilități, [14], [15]:

- transformatorul defazor (rotitor);
- compensatorul serie cu condensatoare;
- regulatoare pentru tensiunea de ieșire a generatoarelor;
- compensatorul șunt (transversal) cu condensatoare.

Performanțele obținute în domeniul convertoarelor de mare putere destinate transportului în c.c. au dus la apariția unor dispozitive capabile să regleze de o manieră dinamică circulațiile de putere activă și/sau reactivă în rețelele de c.a.

Aceste dispozitive, grupate sub conceptul FACTS, cuprind: compensatorul static șunt (transversal) cu comutație electronică, compensatorul serie (longitudinal) controlat cu tiristoare, transformatorul defazor cu reglaj electronic în sarcină, amortizorul oscilațiilor subsincrone. Există preocupări, în prezent, pentru realizarea acestor dispozitive cu ajutorul convertoarelor statice cu comutație forțată, obținându-se așa-numitele *"dispozitive FACTS avansate"*.

5.4.2. Tranzitul de putere printr-o linie electrică

Ecuațiile care definesc transferul de energie în lungul liniilor electrice de transport, sunt, [16]:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2 I}{dx^2} &= (r_0 + j\omega l_0)\cdot(g_0 + j\omega c_0)I \\ \frac{d^2 U}{dx^2} &= (r_0 + j\omega l_0)\cdot(g_0 + j\omega c_0)U, \end{aligned}\right\} \qquad (5.8)$$

unde: r_0, l_0, g_0 și c_0 reprezintă rezistența, inductanța, conductanța și respectiv capacitatea lineică.

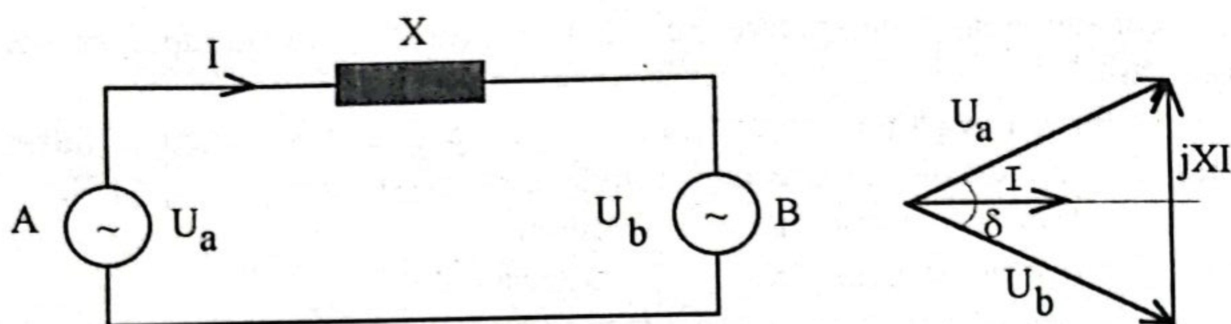


Fig.5.25
Transmisia energiei printr-o linie

In cazul unei linii electrice de transport fără pierderi care leagă între ele două surse sincrone A și B, Fig.5.25, expresia puterii active transmise este:

$$P = \frac{U_a \cdot U_b}{Z_0 \cdot \sin\phi_L} \cdot \sin\delta, \qquad (5.9)$$

unde: U_a, U_b sunt tensiunile efective la extremitățile liniei, δ-unghiul de defazaj (denumit unghi de transport) dintre cele două tensiuni, Z_0-impedanța caracteristică ($Z_0 = \sqrt{l_0/c_0}$), $\phi_L = L \cdot \beta$, unde L lungimea liniei de transport iar β constanta de propagare pe linie ($\beta = \omega \cdot \sqrt{l_0 \cdot c_0}$).

Pentru lungimi mici $\sin\phi_L \cong \phi_L$, și atunci rezultă:

$$P = \frac{U_a \cdot U_b}{X} \cdot \sin\delta, \qquad (5.10)$$

unde: $X = l_0 \cdot L$ este reactanța liniei.

Dacă tensiunile la extremitățile liniei sunt menținute egale și constante $U_a = U_b = U_0$, vom avea:

$$P = \frac{U_0^2}{X} \cdot \sin\delta = P_0 \cdot \sin\delta, \qquad (5.11)$$

unde P_0 este puterea naturală (în jur de 500 MW pentru o linie de 400 kV cu o impedanță caracteristică Z_0=300 Ω).
Puterea reactivă schimbată între surse și linie, în aceleași condiții, este:

$$Q = \frac{U_0^2}{X}(1-\cos\delta) . \qquad (5.12)$$

Posibilitățile teoretice pentru reglarea tranzitului de putere, conform ecuației (5.10) sunt:

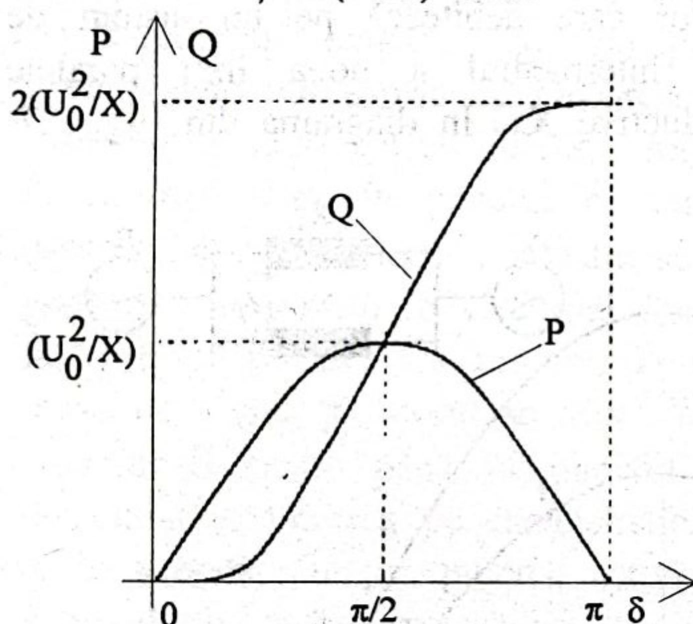


Fig.5.26

Variația puterii active și reactive funcție de unghiul de transport

- modificarea tensiuniilor efective U_a și U_b (în realitate ele nu pot fi modificate decât în limite reduse);
- modificarea reactanței X a liniei de transport;
- modificarea ungiului de transport δ.

In Fig.5.26 este prezentată variația puterii active și reactive în funcție de unghiul de transport δ, observându-se o putere activă maximă tranzitată pentru un unghi δ=90°. Partea stabilă a caracteristicii P(δ) este pentru δ cuprins între 0°...90°, în practică funcționându-se, din motive de stabilitate a generatoarelor, cu un coeficient de stabilitate statică K_s între 1,15...1,20 și un unghi δ între 35°...40°. Coeficientul K_s este definit de relația:

$$K_s = \frac{P_0}{P} , \qquad (5.13)$$

unde: P_0 puterea maximă iar P puterea debitată de generator.

Punctele de funcţionare de pe caracteristica P(δ) care satisfac condiţia:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0\,, \qquad (5.14)$$

raport denumit criteriul stabilităţii statice, sunt puncte stabile de funcţionare.

5.4.3. Creşterea rezervei de stabilitate dinamică şi a tranzitului de putere

Considerăm un generator care debitează pe un sistem de bare de putere infinită prin intermediul a două linii paralele caracterizate prin reactanţele inductive X_1. In diagrama din Fig.5.27

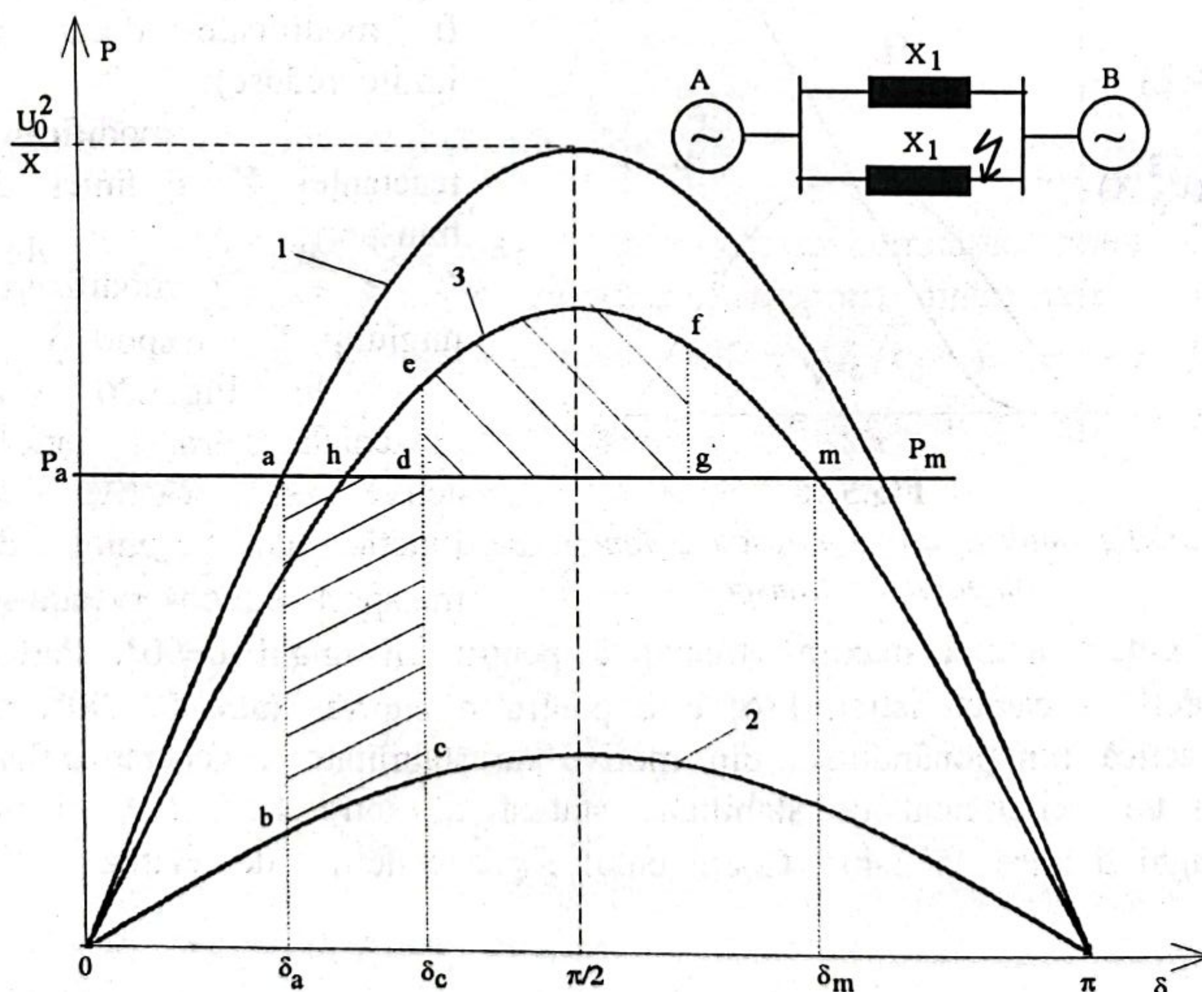


Fig.5.27
Diagrama de stabilitate

sunt prezentate trei caracteristici de putere ale generatorului, astfel: 1 este caracteristica de regim normal, 2-caracteristica regimului de avarie corespunzătoare unui scurtcircuit pe una din linii, 3-caracteristica regimului de după avarie corespunzătoare deconectării liniei avariate, când generatorul rămâne cuplat pe bare printr-o singură linie. In acest caz reactanţa, dintre generator şi bare, care intervine în relaţia (5.10) creşte şi deci caracteristica 3 de după avarie este situată sub caracteristica normală 1.

Presupunem că în regim normal punctul de funcţionare este situat în a, căruia îi corespunde puterea $P_a = P_m$ (P_m puterea dezvoltată de motorul primar) şi unghiul δ_a. In momentul apariţiei scurtcircuitului, punctul de funcţionare trebuie să se mute pe caracteristica de avarie 2. Deoarece unghiul nu se poate modifica instantaneu din cauza inerţiei rotorului, rezultă că punctul de funcţionare trece în punctul b, care corespunde valorii iniţiale a defazajului δ_a. In această situaţie se constată că puterea debitată de generator în punctul b este mai mică decât puterea P_m primită de la motorul primar. Ca urmare, la arborele generatorului apare un exces de cuplu şi rotorul se accelerează, mărindu-şi energia cinetică. Unghiul δ creşte până în punctul c, în care are loc eliminarea defectului şi trecerea pe caracteristica de după avarie, 3, în punctul e. In această situaţie, puterea activă debitată de generator este mai mare decât puterea mecanică şi deci rotorul începe să frâneze. Totuşi, valoarea unghiului nu începe să scadă, ci continuă să crească până în punctul f, datorită inerţiei rotorului. Energia cinetică acumulată de rotor în perioada de accelerare (de la b la c) este eliberată sub formă de putere activă debitată de generator în perioada de frânare (de la e la f). In continuare deoarece punctul de funcţionare, situat în f nu este stabil, urmează deplasarea către punctul stabil h de pe caracteristica de după avarie, 3.

Regimul dinamic încheiat într-un punct stabil de funcţionare este numit regim stabil din punct de vedere dinamic. Se observă că stabilitatea dinamică a sistemului este asigurată numai în cazul când punctul f rămâne în stânga punctului limită m. La cea mai mică depăşire a punctului m, stabilitatea sistemului se pierde, deoarece

unghiul δ continuă să crească şi deci generatorul se desprinde, adică iese din sincronism.

Condiţia ca sistemul să fie stabil din punct de vedere dinamic se poate exprima cu ajutorul ariilor formate de caracteristici şi dreapta de putere constantă. Ariile abcd şi defg sunt proporţionale cu energia cinetică înmagazinată de rotor în perioada de accelerare, respectiv cu energia cinetică eliberată de rotor în perioada de frânare. Sistemul este stabil din punct de vedere dinamic dacă aria maximă de frânare dem=A_1 este mai mare decât aria de accelerare abcd=A_2:

$$A_1 > A_2 \,. \tag{5.15}$$

Condiţia (5.15) este folosită în calculul stabilităţii dinamice pentru a determina unghiul limită δ_c la care se poate deconecta linia defectă fără a se pierde stabilitatea. Se calculează apoi timpul în care unghiul creşte de la δ_a la δ_c şi se alege în mod corespunzător timpul de acţionare al protecţiei care comandă deconectarea liniei defecte.

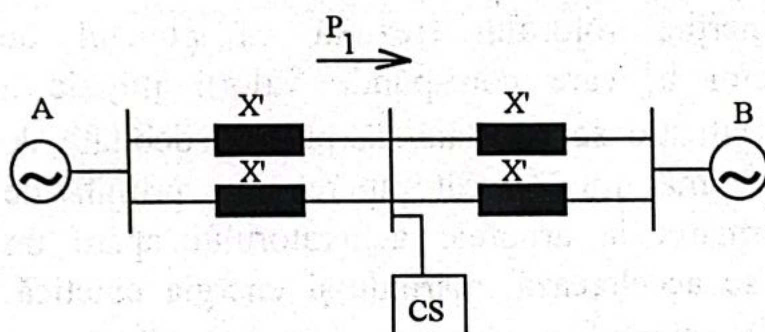


Fig.5.28

Creşterea stabilităţii dinamice prin amplasarea unui dispozitiv de compensare statică

In cazul schemei anterioare amplasăm la mijlocul liniilor un dispozitiv de compesare statică (CS) rapidă a puterii reactive, Fig.5.28. Astfel se obţine o îmbunătăţire a stabilităţii dinamice cuantificată fie prin creşterea rezervei de stabilitate, Fig.5.29a, (sau mărirea timpului maxim admisibil de eliminare a defectului) fie prin creaşterea puterii transmise prin linii, Fig.5.29b, [13].

Puterea maximă P_1 transportabilă din punct de vedere a stabilităţii dinamice se obţine din egalitatea ariilor de accelerare şi frânare (A_1=A_2), Fig.5.27. In această situaţie, pentru o linie ce utilizează un compensator static rapid, se permite creşterea tranzitului de putere de la P_1 la P'_1, Fig.5.29b.

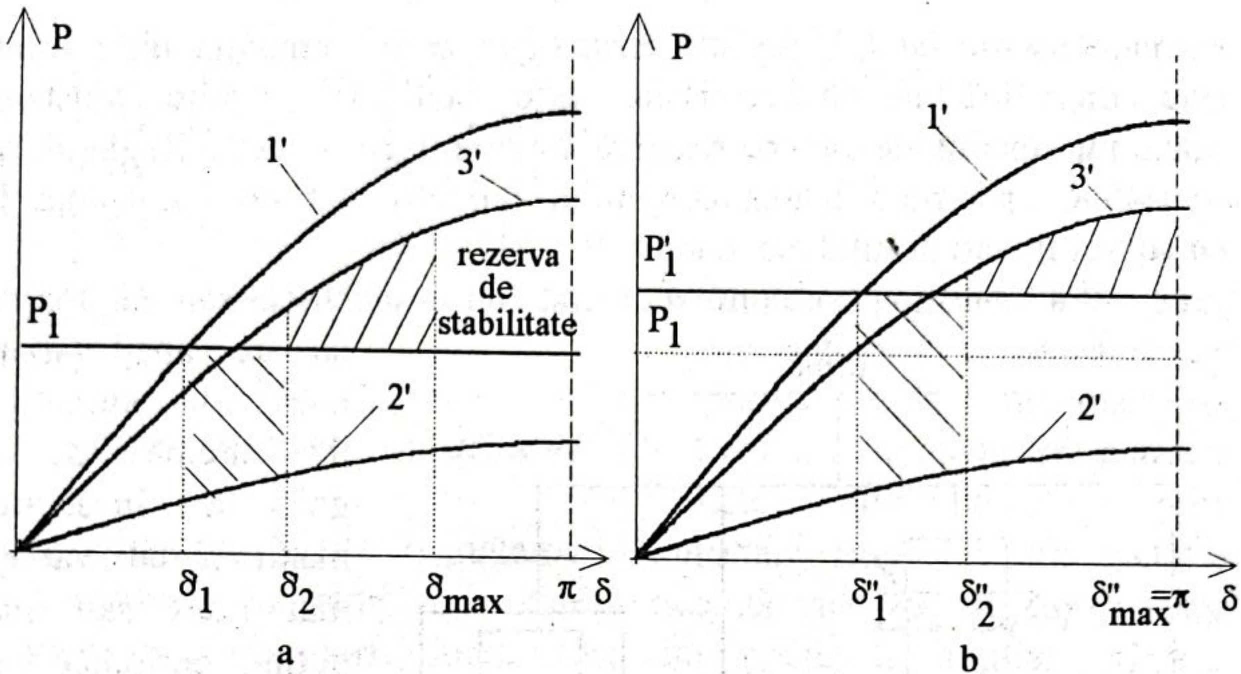


Fig.5.29
Creşterea rezervei de stabilitate (a) respectiv a puterii maxime (b)

5.4.4. Dispozitive FACTS

Compensator static şunt. Compensatoarele statice transversale cu tiristoare (Static var compensator - SVC) răspund în principal cerinţelor consumatorilor industriali cu privire la reglarea tensiunii în condiţiile alimentării unor sarcini extrem de fluctuante, cum sunt laminoarele sau cuptoarele cu arc.

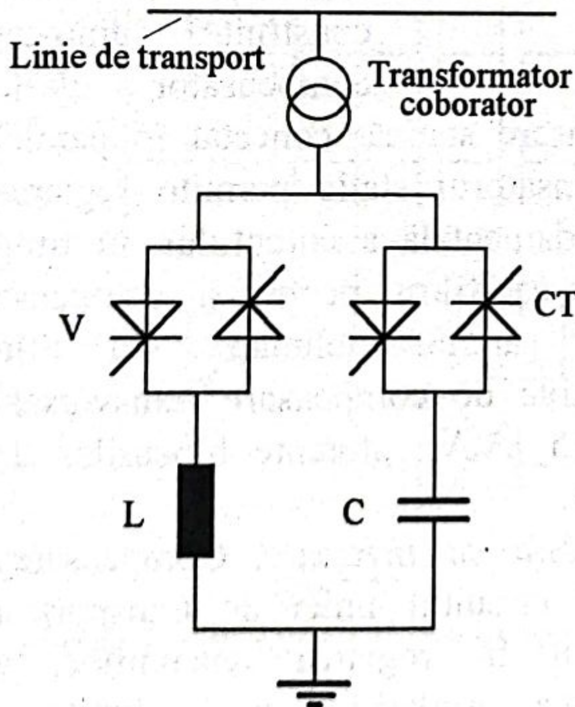


Fig.5.30
Compensator şunt cu tiristoare

Principiul general de reglare este prezentat schematic în Fig.5.30 şi constă în compensarea cât mai exactă a variaţiilor de putere reactivă a sarcinii, prin puterea reactivă injectată la locul de conectare al compensatorului, [1], [8], [13].

O baterie de condensatoare C, scindate în mai multe trepte,

comutate static cu CT (există variante în care comutaţia unor trepte este dinamică iar a celorlalte este statică), permite ajustarea bilanţului mediu de putere reactivă în nodul considerat. Reglajul fin se obţine prin modificarea curentului inductiv dat de inductanţa L, cu ajutorul variatorului de curent V.

La consumatori cum sunt tracţiunea electrică sau cuptoarele cu arc, apar variaţii mari ale curenţilor de sarcină, de la gol la încărcarea maximă, cu variaţii mai mult sau mai puţin periodice şi cu neliniarităţi care produc abateri de la forma armonică ale curenţilor şi tensiunilor. Compensatoarele hibride de putere, Fig.5.31, sunt construite dintr-un compensator clasic de putere reactivă, cu rol de compensare statică, conectat în paralel cu un compensator dinamic. Compensatorul static permite reglarea puterii reactive după componenta fundamentală a curentului, în timp ce compensatorul dinamic intervine ca filtru pentru a compensa armonicile introduse sub acţiunea sarcinii neliniare. Cu titlu experimental, [10], astfel de dispozitive de compensare transversală sunt construite pentru puteri de 45/15 kVAr, aferente blocurilor de compensare statică respectiv dinamică.

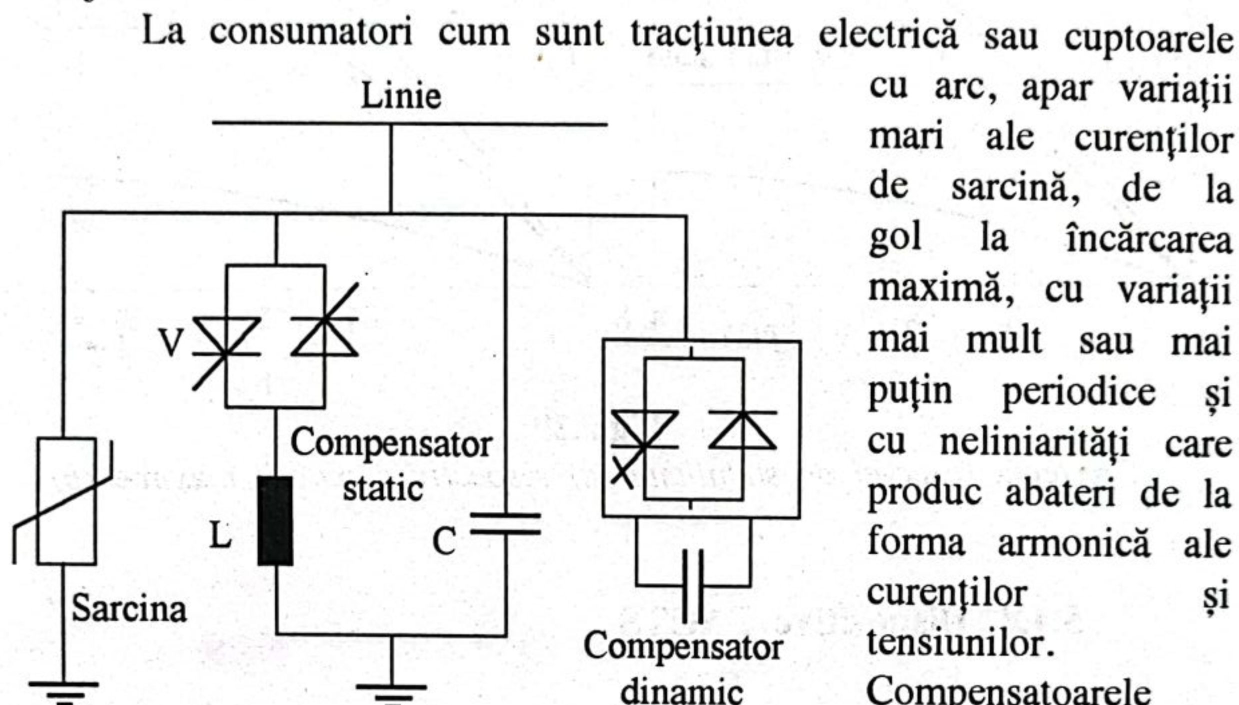


Fig.5.31
Compensator şunt hibrid

Compensatoare serie controlabile cu tiristoare. Compensarea longitudinală constă în înserierea pe circuitul liniei de transport a unei impedanţe controlabile cu rol în reglarea tensiunilor, a circulaţiilor de putere, în amortizarea oscilaţiilor şi în limitarea curenţilor de scurtcircuit.

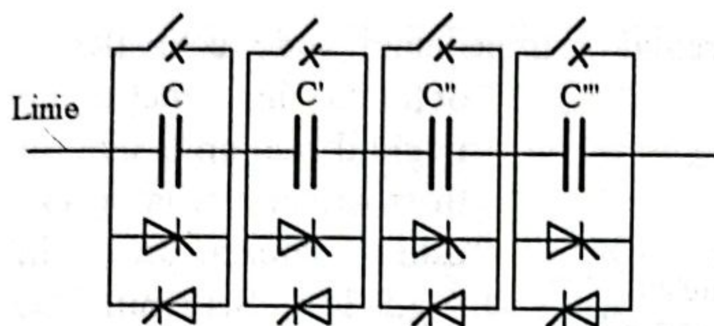


Fig.5.32
Compensator serie cu tiristoare

Un prim tip constructiv de compensator serie cu tiristoare, Fig.5.32, se obţine prin înserierea unor baterii de condensatoare de valori diferite, care sunt conectate sau deconectate cu ajutorul unor comutatoare cu tiristoare montate în paralel. Este astfel posibil, prin diverse combinaţii de comutatoare conectate respectiv deconectate, de a modifica în trepte cu o viteză ridicată valoarea de compensare a liniei de transport, lucru care nu poate fi obţinut printr-o comutaţie mecanică.

Un al doilea tip de compensator serie, Fig.5.33, diferit de primul foloseşte proprietatea unui circuit rezonant paralel de a avea după frecvenţa de rezonanţă o impedanţă capacitivă a cărei valoare depinde de dezacordul de frecvenţă. Un asemenea dispozitiv, construit de firma Siemens, a fost montat de către compania americană Western Area Power Administration, pe o linie de 230 kV în anul 1993, [8].

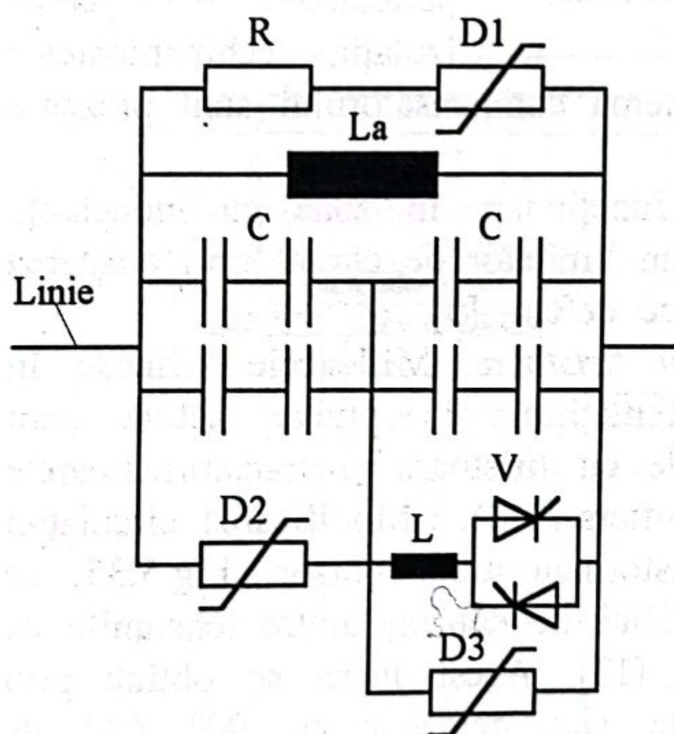


Fig.5.33
Compensator serie cu circuit rezonant

In schemă dezacordul faţă de frecvenţa de rezonanţă este reglat prin variaţia curentului prin inductanţa L cu ajutorul variatorului realizat cu tiristoare V. Inductanţa L se găseşte montată în paralel cu o treaptă a bancului de condensatoare C. Impedanţa echivalentă a compensatorului variază în funcţie de curentul reglat prin variator.

Caracteristica tipică de reglaj a impedanței serie echivalente, obținută în funcție de unghiul de amorsare al tiristoarelor variatorului, este prezentată în Fig.5.34. Sistemul de control-comandă al tiristoarelor trebuie să fie foarte sigur deoarece dacă unghiul de amorsare ajunge în zona interzisă, în care se poate obține rezonanța, atunci la bornele dispozitivului vor apare supratensiuni periculoase pentru izolația echipamentelor electrice. Din acest motiv în schema compensatorului sunt prezente descărcătoarele D1, D2 și D3.

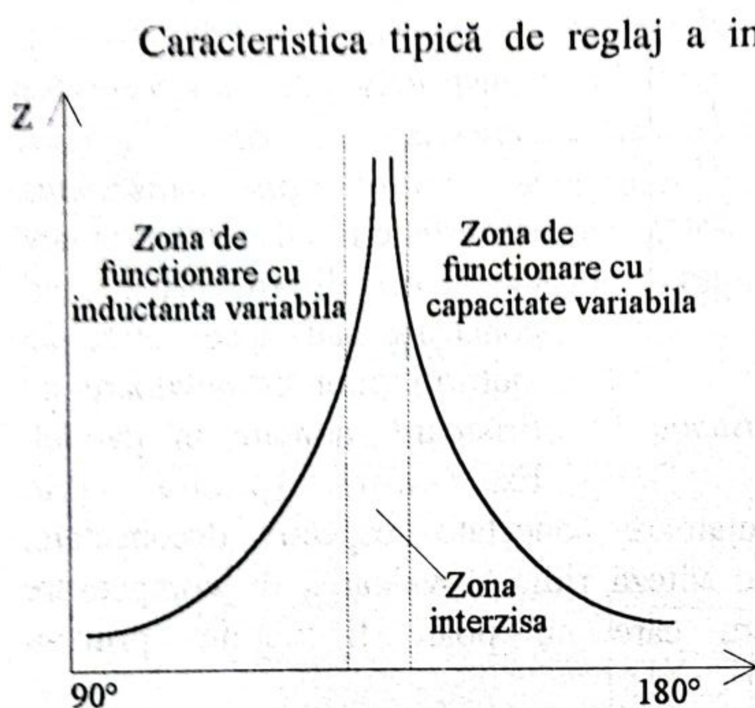


Fig.5.34

Caracteristica de reglaj a impedanței compensatorului serie cu circuit rezonant

Trebuie remarcat că la funcționare în zona cu inductanță variabilă, dispozitivul constituie un limitator de curent prin creșterea impedanței dintre sursă și locul de defect, [5].

Transformator defazor cu tiristoare. Mijloacele utilizate în prezent pentru modificarea circulațiilor de putere activă sunt compensatoarele serie controlabile cu tiristoare și transformatoarele defazoare sau rotitoare (phase shifters-PHS). Modificarea circulației de putere activă în cazul transformatorului defazor, Fig.5.35, se realizează prin modificarea unghiului de defazaj dintre tensiunile de la capetele liniei de transport, [13]. Acest lucru se obține prin injecția unei tensiuni adiționale U_a, defazată cu 90° față de tensiunea U a liniei, rezultând o tensiune U' defazată cu unghiul α față de tensiunea U. Reglarea unghiului de defazaj α se realizează prin modificarea modulului tensiunii adiționale cu ajutorul comutatorului cu ploturi CM, obținându-se astfel o modificare a circulației de putere în sensul dorit.

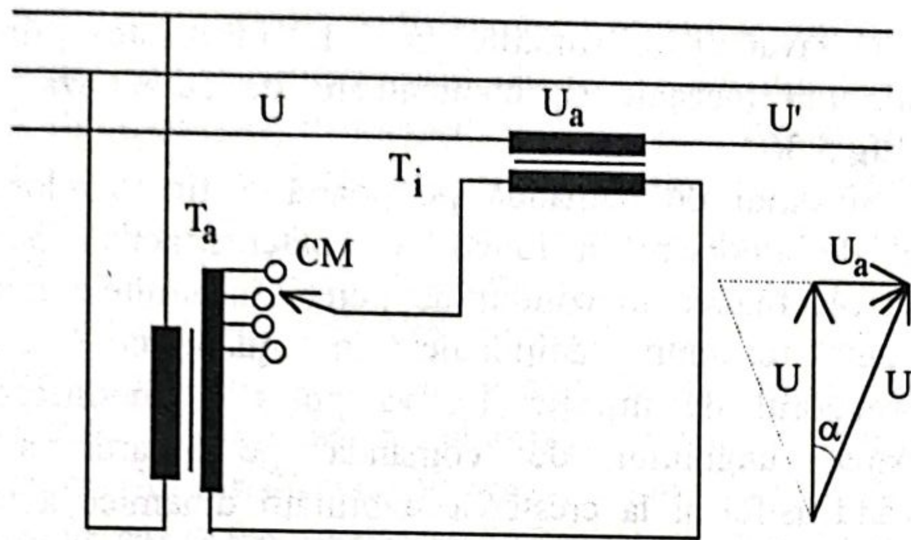


Fig.5.35

Schema principială a transformatorului defazor

Dezavantajele principale ale acestui dispozitiv datorate comutării mecanice a ploturilor sunt: viteză mică de răspuns, reglaj în trepte, număr redus de acţionări.

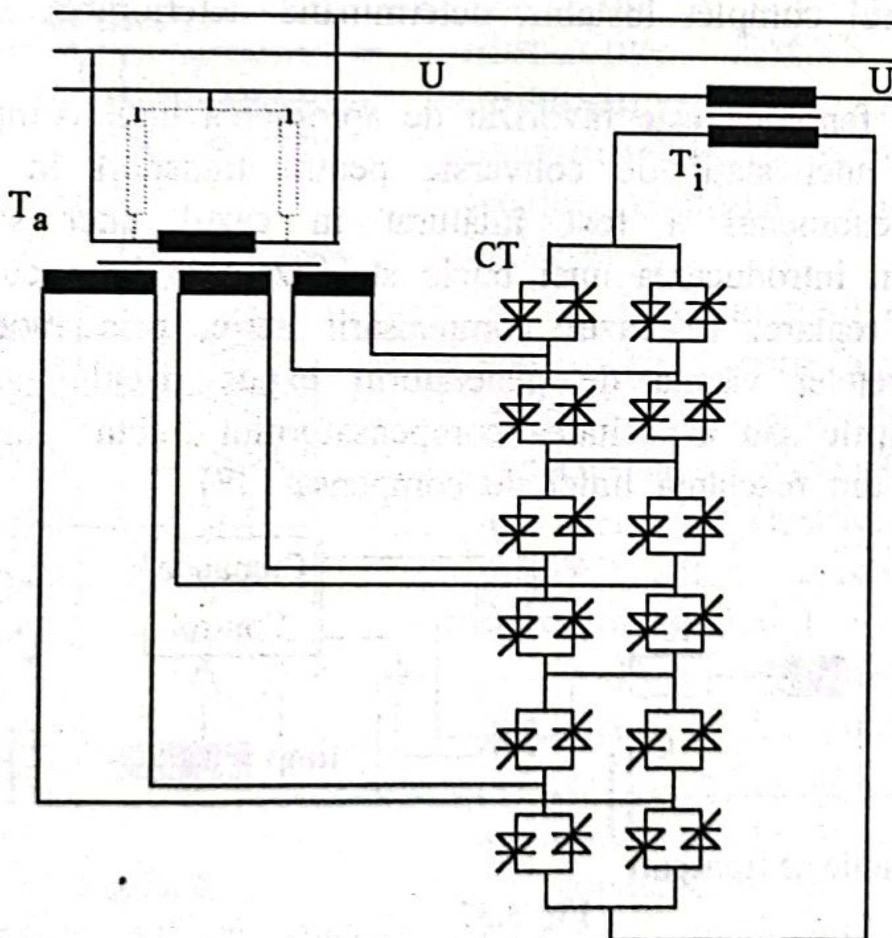


Fig.5.36

Transformator defazor cu tiristoare

Dezavantajele amintite pot fi eliminate prin schimbarea comutatorului mecanic cu comutatoare statice realizate cu tiristoare (CT), Fig.5.36.

Sistemul de comandă pe poartă a tiristoarelor va modifica unghiul de amorsare în funcţie de puterea activă pe linie făcând posibilă menţinerea tranzitului de putere în limitele dorite. Valoarea modulului tensiunii adiţionale în quadratură U_a, dată de transformatorul de injecţie T_i, va putea fi modificată rapid prin schimbarea unghiului de comandă pe poartă a tiristoarelor, conducând astfel şi la creşterea stabilităţii dinamice a reţelei.

Amortizor pentru oscilaţii subsincrone. Oscilaţiile subsincrone se traduc printr-un fenomen de cuplaj electromagnetic între generatoare şi reţeaua electrică, fenomen care poate provoca ruperea arborelui generatorului. In anumite condiţii poate apare, o oscilaţie de joasă frecvenţă a puterii electrice ceea ce duce la o oscilaţie de torsiune cu o frecvenţă ce coincide cu frecvenţa proprie mecanică a arborelui generatorului. Anumite configuraţii ale reţelei electrice pot face fenomenul complet instabil, determinând deteriorarea arborelui generatorului.

Acest fenomen este favorizat de apropierea unui compensator serie sau a unei staţii de conversie pentru transport în c.c. de generator. Fenomenul a fost înlăturat în cazul unei staţii de conversie prin introducerea unei bucle stabilizatoare în circuitele de comandă şi reglare. In cazul compensării serie, prin modificarea impedanţei reţelei văzută de generatorul expus riscului se poate atenua oscilaţiile sau capacitatea compensatorului trebuie limitată la maxim 30% din reactanţa liniei de compensat, [8].

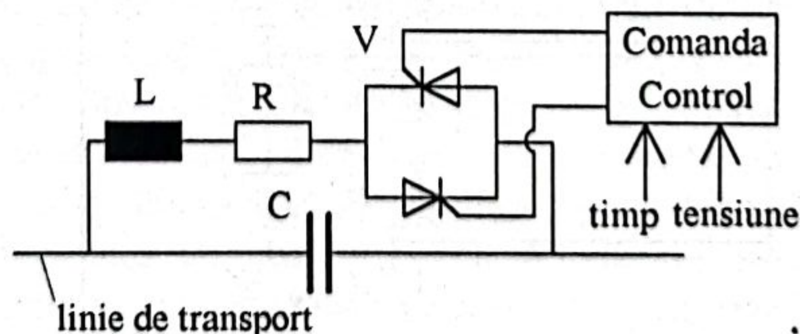


Fig.5.37

Amortizor de oscilaţii subsincrone

Amortizorul oscilaţiilor subsincrone (denumit NGH-SSR Damper după numele inventatorului său Narain G. Hingorami, [4]), Fig.5.37, constă dintr-un circuit realizat prin conectarea în serie a unui variator de c.a. V, o impedanţă L de valoare mică şi un rezistor R, circuit conectat în paralel cu compensatorul serie C. Fenomenul oscilaţiilor de joasă frecvenţă influenţează (măreşte) durata semialternanţelor tensiunii din reţeaua afectată. Absorbind energie cu ajutorul unei rezistenţe în timpul semialternanţelor cu durată mai mare este posibil de a amortiza fenomenul. Astfel valvele cu tiristoare ale variatorului V vor fi comandate după 180° sau după 10 ms, în cazul frecvenţei de 50 Hz, de la fiecare trecere prin zero a tensiunii. Dacă unda de tensiune conţine şi alte frecvenţe, atunci fiecare semiperioadă va fi mai mare de 10 ms. In acest caz, prin valvele amorsate va circula un curent, care va determina un consum de energie pe rezistenţa R şi astfel se obţine amortizarea oscilaţiilor.

Compensator şunt cu comutaţie forţată. Acesta face parte din a doua generaţie de dispozitive FACTS (denumite avansate), îmbunătăţind performanţele compensatorului static controlat cu tiristoare (SVC).

In cazul unui compensator şunt cu comutaţie forţată, Fig.5.38, un convertor c.a.-c.c. conectat la un element de stocare a energiei electrice, schimbă putere reactivă cu reţeaua într-un sens sau în altul.

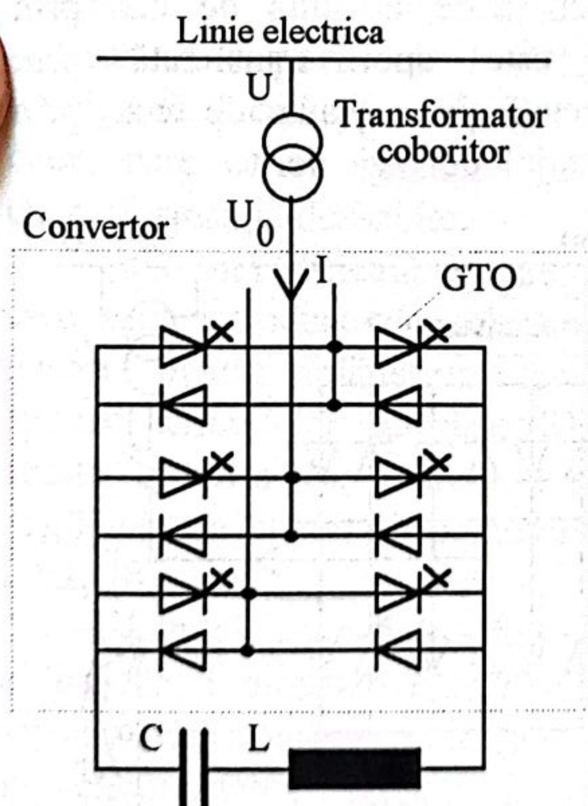


Fig.5.38
Compensator şunt cu comutaţie forţată

Dacă tensiunea U_0' este mai mare ca U, curentul I este defazat cu $\pi/2$ înaintea tensiunii şi compensatorul se comportă ca un condensator ce furnizează o putere reactivă capacitivă. Dacă în schimb tensiunea U_0 este mai

mică decât U, curentul este defazat în urma tensiunii şi compensatorul se comportă ca o inductanţă absorbind o putere reactivă de la linia de transport.

Puterea reactivă furnizată de un compensator şunt clasic depinde de pătratul tensiunii, astfel că dispozitivul devine ineficace în cazul scăderilor mari de tensiune, tocmai când este mai mare nevoie de el.

Puterea reactivă furnizată de compensatorul cu comutaţie forţată depinde de produsul dintre tensiune şi curent, astfel că în cazul scăderii tensiunii puterea reactivă este menţinută la valoarea dorită prin creşterea valorii curentului furnizat, curent care poate fi modificat independent de tensiune.

Pentru realizarea comutaţiei forţate convertorul este realizat cu ajutorul tiristoarelor cu blocare pe poartă (GTO).

Regulator universal de putere. In Fig.5.39 este prezentată schema principială a unui regulator universal de putere obţinut prin asocierea pe partea de c.c. a două convertoare cu comutaţie forţată.

Regulatorul preia o putere activă de la linia de c.a. prin transformatorul auxiliar T_a, care este apoi transferată prin convertorul 1, respectiv 2 şi reinjectată în reţeaua de c.a. prin transformatorul de injecţie T_i cu defazajul de fază dorit.

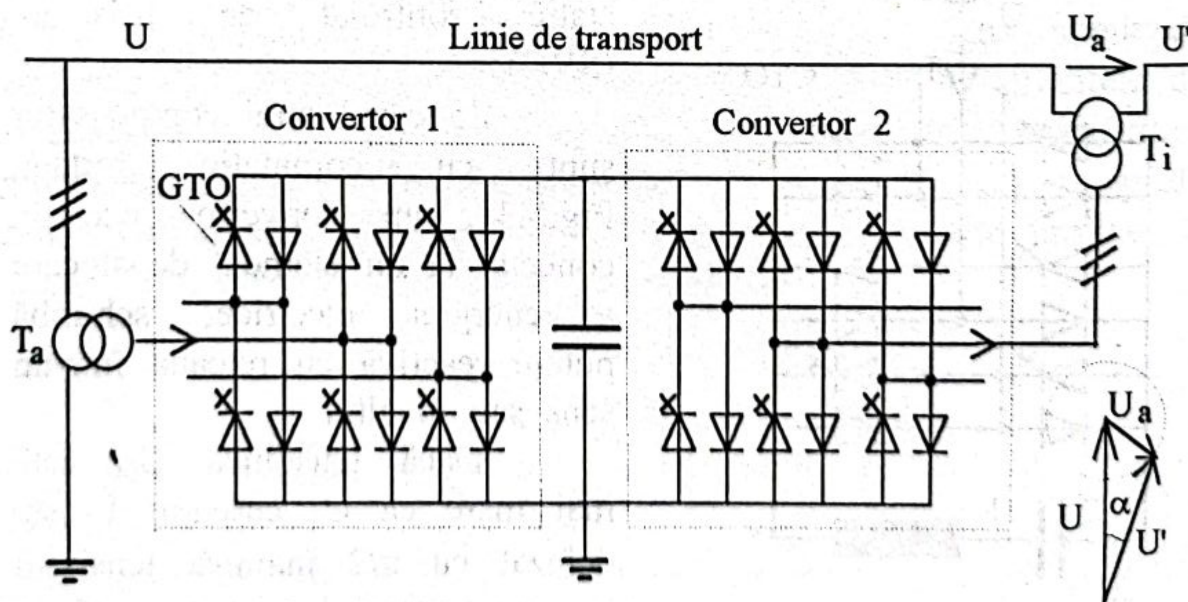


Fig.5.39
Regulator universal de putere

Convertorul 1 este capabil în acelaşi timp de a acţiona şi ca un compensator şunt, absorbind sau injectând puterea reactivă dorită. Convertorul 2 poate funcţiona de o manieră asemănătoare unui compensator serie injectând o putere reactivă în relaţia de fază dorită cu reţeaua din amonte.

Sistemul prezentat poate deci acţiona ca un regulator triplu: compensator şunt, compensator serie şi defazor.

5.4.5. Dificultăţi legate de introducerea dispozitivelor FACTS

O primă problemă în cazul unei reţele dotate cu dispozitive FACTS este aceea de a coordona în timp real funcţionarea acestora. Astfel, un dispozitiv FACTS poate aduce individual o ameliorare locală a comportamentului reţelei, evitând spre exemplu suprasarcina pe o linie dată. Totodată această ameliorare locală poate crea probleme pe alte linii vecine din reţeaua considerată. Deci va fi necesar ca dispozitivele FACTS să fie dotate cu un maximum de inteligenţă locală, iar acţiunea acestora să fie coordonată în timp, coordonare ce va presupune un sistem de telecomunicaţii sigur şi cu performanţe deosebite.

O altă dificultate care apare este cea legată de armonicele care sunt introduse de echipamentele ce fac apel la electronica de putere. Pentru înlăturarea lor există soluţia filtrării, realizată cu ajutorul circuitelor acordate RLC. Trebuie ţinut cont de faptul că aceste circuite de filtrare reprezintă o parte care nu poate fi neglijată din costul dispozitivului, ajungând până la 10% din costul total, [8].

Un alt aspect deosebit de important şi puţin studiat este cel al influenţei dispozitivelor FACTS asupra sistemului de protecţie al reţelei. Funcţionarea protecţiei de distanţă, a cărui principiu constă în deconectarea reţelei la apariţia unei abateri anormale a impedanţei acesteia în cazul unui defect, va fi perturbată în cazul prezenţei unui dispozitiv FACTS, deoarece acesta modifică într-o plajă foarte mare impedanţa reţelei. Totodată însăşi protecţia internă a acestor dispozitive pune probleme deosebite.

Bibliografie

1. Baraboi A., Adam M., Intrerupătoare de putere cu comutație în hexafluorură de sulf, Energetica, Nr. 5-B, 1992
2. Gălățeanu S. B., Stoichescu D. A., Constantin P., Electronică de putere. Editura Militară, București, 1991
3. Girard M., Electronique industrielle. McGraw-Hill, Paris, 1987
4. Hingorani N. G., Flexible ac transmission, IEEE Spectrum, April 1993, p 40-45
5. Karaday G. G., Concept of combined short circuit limiter and series compensator, IEEE Trans. on Power Delivery, 6, 3, 1031, 1991
6. Kuwahara N., Yamauchi T., Yoshioka Y., Kurosawa Y., Hirasawa K., Yanabu S., Kaneko E., "Recent developments in circuit breakers" Switching phenomena in high-voltage circuit breakers. Edited by Nakarishi K., New York, 1991
7. Lander C. W., Electronique de puissance. McGraw-Hill, Paris, 1989
8. Le Du A., Pour un réseau électrique plus performant: le projet FACTS, RGE, N° 6, 1992
9. Lokuta F. P., Le MCT va se substituer à l'IGBT, Electronique, N° 28, 1993
10. Marshall D. A., Van Wyk J. D., An evaluation of the real-time compensation of fictitious power in electric energy net-works, IEEE Trans. on Power Delivery, 6, 4, 1774, 1991
11. Matlac I., Convertoare electromagnetice. Editura Facla, Timișoara, 1987
12. Mihăileanu C., Scarlat C., Neagu V., FACTS devices use to direct active power flows in electric networks, Very High Voltage Networks Symposium, Sibiu, România, 1995, vol.II, p. 114-118
13. Mihăileanu C., Neagu V., Scarlat C., SVC utilisation to improve transient stability of certain RPS zones,

Very High Voltage Networks Symposium, Sibiu, România, 1995, vol.II, p. 124-129
14. Mihăileanu C., Neagu V., Scarlat C., Utilizarea tehnicilor FACTS pentru îmbunătăţirea performanţelor sistemelor electroenergetice, Energetica, Nr.4, Seria B, 1995, p. 181-184
15. Mihăilescu F., Manolescu G., Prospects of FACTS in Romania, Very High Voltage Networks Symposium, Sibiu, România, 1995, vol.II, p. 119-123
16. Poeată A., Arie A. A., Crişan O., Eremia M., Buta A., Alexandrescu V., Transportul şi distribuţia energiei electrice. Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1981
17. Ryan H., Jones G., SF_6 Switchear. Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1989

Capitolul 6

MENTENANŢA TEHNICII DE COMUTAŢIE

6.1. Generalităţi

Instalaţiile electrice ale unui sistem energetic cuprind o mare varietate de echipamente electrice, o pondere şi însemnătate deosebită revenind echipamentelor electrice de comutaţie, îndeosebi întrerupătoarelor.

De funcţionarea normală a acestor echipamente electrice depinde continuitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor. Astfel, siguranţa în funcţionare a întrerupătoarelor nu este dată numai de o fiabilitate potenţială (de proiect), ci şi de fiabilitatea operaţională (funcţională) care depinde în mod direct de modul în care sunt exploatate şi întreţinute aceste echipamente.

In prezent, pentru a asigura o funcţionare sigură şi ecomonică este necesar să se desfăşoare o activitate atentă de exploatare şi să se aplice un sistem preventiv planificat de întreţinere şi reparaţii a echipamentelor electrice.

Pe plan mondial, ultimii ani au adus în domeniul siguranţei în funcţionare a întrerupătoarelor utilizarea unor metode şi sisteme de monitorizare şi diagnosticare, care analizează starea tehnică şi defecţiunile posibile ale acestora. Consecinţa firească a acestor sisteme fiind reducerea duratelor totale de indisponibilitate, respectiv creşterea capacităţii de funcţionare a instalaţiilor electrice.

Pentru tipurile constructive de întrerupătoare existente (cu ulei puţin, hexafluorură de sulf în tehnică pneumatică respectiv

autopneumatică, etc.) specialiştii recomandă dezvoltarea metodelor şi sistemelor de monitorizare şi diagnosticare în special pentru întrerupătoarele cu hexafluorură de sulf (SF_6) în tehnică autopneumatică sau cu o singură presiune.

In studiul efectuat de ISPE[1] în legătură cu dezvoltarea Sistemului Energetic Naţional (SEN) în următorii ani, cu privire la echipamentul electric de comutaţie de înaltă tensiune, s-a ajuns la concluzia extinderii construcţiei echipamentelor, folosind ca mediu electroizolant şi de stingere a arcului electric, hexafluorura de sulf (SF_6). Astfel gama tensiunilor nominale va urca de la (72,5...170) kV în prezent, la 245 kV şi respectiv 420 kV, în viitor. Datorită calităţilor bune ale acestor echipamente, cum ar fi: fiabilitatea ridicată, durate mici de arc, funcţionarea silenţioasă, gabaritul redus, costul redus de instalare şi întreţinere, numărul acestor echipamente montate în instalaţiile energetice din ţară va creşte, [3], [26].

Pe plan mondial orientarea spre echipamentele de comutaţie cu SF_6 s-a realizat cu mult timp în urmă (zeci de ani), în prezent o atenţie deosebită fiind acordată metodelor şi sistemelor de monitorizare şi diagnosticare care, sunt utilizate de către constructor pentru îmbunătăţirea performanţelor echipamentelor produse şi de utilizator pentru analiza stării tehnice şi a defecţiunilor posibile ale echipamentului în vederea diminuării costului mentenanţei şi a ameliorării fiabilităţii.

In costul energiei electrice, care reţine puternic atenţia consumatorilor, costurile mentenanţei sunt componente importante din costul total al energiei furnizate, această situaţie motivând necesitatea de a reduce aceste costuri.

In staţiile de transformare care vor conţine sisteme de comandă pe baza calculatorului, dispozitivele de monitorizare şi diagnosticare ale întrerupătoarelor vor putea fi integrate în aceste sisteme. Acest lucru va fi posibil mai ales în viitor, când dispozitivele de diagnosticare vor completa din ce în ce mai mult sistemele de protecţie ale instalaţilor electrice.

---

[1]ISPE - Institutul de studii şi proiectări energetice, Bucureşti

Aceste motivaţii au dus la a considera că şi în ţara noastră va trebui acordată, în viitor, o atenţie deosebită metodelor şi sistemelor de monitorizare şi diagnosticare ale echipamentelor de comutaţie şi în mod special întrerupătoarelor şi celulelor capsulate cu SF_6.

6.2. Oportunitatea monitorizării şi diagnosticării tehnice

6.2.1. Definirea noţiunilor de monitorizare şi diagnosticare

Pentru a evita, pe cât posibil, eventualele confuzii legate de noţiunile de monitorizare şi diagnosticare, precum şi alte noţiuni din aceeaşi sferă a problemei abordate, precizăm câteva definiţii, [6], [23], [29], [30], [31]:

Fiabilitatea: aptitudinea unui element, dispozitiv (echipament) de a-şi îndeplini funcţia specificată în condiţii date, de-a lungul unei perioade de referinţă precizate.

Mentenabilitate: aptitudinea unui element, echipament, în condiţii date de utilizare, de a fi menţinut sau restabilit în starea de a-şi îndeplini funcţia specificată atunci când mentenanţa se efectuează în condiţii date cu procedee şi remedii prescrise.

Mentenanţa: ansamblul de acţiuni tehnice şi administrative, incluzând şi acţiunile de supraveghere în vederea obţinerii de informaţii cu privire la echipament, ce permit menţinerea sau restabilirea unei stări specificate. Distingem următoarele tipuri de mentenanţă: corectivă sau curativă, respectiv preventivă.

Mentenanţa corectivă sau *curativă:* este mentenanţa care se aplică după apariţia defectului.

Mentenanţa preventivă: este mentenanţa care vizează diminuarea posibilităţilor de defectare a unui sistem. Ea poate fi:

- *mentenanţă sistematică (planificată):* este mentenanţa ce se efectuează după criterii predeterminate;

- *mentenanţă condiţională* sau *predictivă (oportună):* este mentenanţa preventivă care implică efectuarea unui diagnostic

înainte de a înlocui elementul, echipamentul inspectat (controlat, supravegheat).

Diagnosticul: reprezintă, determinarea cauzei (cauzelor) unei anomalii (defectări) în funcţionarea unui sistem (echipament), plecând de la simptome şi/sau observaţii. Termenul "*diagnostic*" vine din greceşte. Etimologic el este compus din "*dia*" care semnifică "*prin*" şi "*gnosis*" care semnifică "*cunoaştere*". Această etimologie arată importanţa deţinerii unor date cât mai ample legate de sistem, în scopul stabilirii diagnosticului. Diagnosticul caută originea defectării unui sistem.

Defectarea: încetarea aptitudinii unui sistem (element, subansamblu) de a asigura (realiza) o funcţie impusă.

Defectul: orice cauză care determină incapacitatea unui sistem (echipament, element, etc.) de a realiza o funcţie impusă. Un defect va necesita acţiuni de mentenanţă.

Tehnici de diagnoză: cuprind toate modurile de inspecţie, măsurare şi/sau monitorizare fără acţiuni de demontare, chiar cu echipamentul în funcţiune, în vederea indicării stării tehnice a acestuia, respectiv pentru a localiza, identifica şi evalua importanţa unui defect după ce el a apărut, sau a unui defect în curs de apariţie, şi pentru a determina în final programul optim de revizie.

Revizia: constă în activitatea care are ca obiectiv repararea sau înlocuirea componentelor defecte, găsite în urma inspecţiilor, testelor sau sunt cerute de fabricant, în vederea reparării componentului defect sau/şi a echipamentului electric.

Inspecţia: reprezintă examinarea periodică a principalelor caracteristici ale echipamentului, fāra nici o demontare.
Notă - această examinare este efectuată de către personalul de exploatare şi are drept scop imediat, în cazul echipamentelor de comutaţie, verificarea: presiunii, nivelului uleiului, etanşeităţilor, poziţia releelor, poluarea izolatoarelor, etc.

Teste de diagnoză: cuprind testele comparative ale parametrilor caracteristici ai echipamentelor de comutaţie, în vederea verificării performanţelor funcţionale prin măsurarea unuia sau a mai multora dintre aceşti parametri (măsurători efectuate cu traductoare şi dispozitive de prelucrare a datelor, conectate temporar la

echipament), şi compararea valorilor măsurate cu valorile specificate de fabricant sau cu valorile determinate la testele anterioare;
Notă - testele sunt executate cu echipamentul scos din funcţiune.

Monitorizarea (supravegherea): constă în observarea automată a parametrilor caracteristici ai echipamentului pentru a verifica performanţele funcţionale ale acestuia prin măsurarea unuia sau a mai multora dintre aceşti parametri (măsurători efectuate cu traductoare şi dispozitive de prelucrare a datelor, conectate permanent la echipament), şi compararea automată a valorilor măsurate cu valorile specificate de fabricant sau cu valorile determinate anterior;
Notă - monitorizarea sau supravegherea poate fi efectuată cu echipamentul scos, sau nu, din funcţiune.

Monitorizarea continuă: este monitorizarea în care informaţiile de la echipament sunt transmise în mod continuu.

Monitorizarea periodică (temporară): este monitorizarea în care informaţiile de la echipament sunt transmise periodic.

6.2.2. Aspecte tehnice şi economice privind monitorizarea şi diagnosticarea echipamentelor de comutaţie

La ora actuală metodele de control şi încercările realizate de constructor la fabricarea echipamentului şi cele realizate de utilizator la punerea în funcţiune sunt bine definite şi aplicate în mod curent este opinia Grupului de Lucru 23.03 al CIGRE[2], [28]. Dar odată ce echipamentul de comutaţie (întrerupătorul) a fost montat în exploatare se pune problema de a şti cum să realizăm o întreţinere cu un preţ de cost cât mai scăzut, cu un risc minim de defectare şi cu o durată de întrerupere redusă. Răspunsul la o asemenea problemă apelează la monitorizarea şi diagnosticarea stării tehnice a echipamentului, cu ajutorul sistemelor de monitorizare şi diagnosticare.

---

[2]Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension

Opțiunile în legătură cu metodele de supraveghere și diagnosticare a stării întrerupătoarelor sunt diferite în rândul specialiștilor, atât pro cât și contra. Aceste metode pot prezenta interes în măsura în care ele permit evitare incidentelor în exploatare, ameliorarea fiabilității, creșterea capacității de funcționare a instalațiilor și de asemenea prezintă un interes economic.

In exploatarea unei rețele electrice, unul din lucrurile care deranjează introducând perturbații, este scoaterea din funcțiune a unui component al rețelei care duce la întreruperi neprogramate în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor. Aceste perturbații pot fi limitate dacă scoaterea din funcțiune a componentului defectabil poate fi făcută înainte de manifestarea defectului, de unde interesul de a cunoaște modul de apariție al unui defect.

O rezervă în ce privește utilizarea sistemelor de supraveghere si diagnosticare este aceea legată de posibilitatea reducerii fiabilității instalațiilor electrice, recunoscut fiind că echipamentele de comutație cu SF_6 au o fiabilitate bună, iar fiabilitatea unui sistem de supraveghere și diagnosticare poate fi mai scăzută. Acest lucru este înlăturat dacă este prevăzut ca personalul de exploatare să ia decizia scoaterii din funcțiune a întrerupătorului utilizând informațiile multiple provenite de la sistemul de supraveghere. De altfel la proiectare unui asemenea sistem se are în vedere ca acesta să nu provoace niciodată ieșirea, fără motiv, din funcțiune a întrerupătorului.

Un sistem de monitorizare și diagnosticare duce la creșterea prețului echipamentului de comutație cu atât mai mult, cu cât se dorește o supraveghere și o analiză mai complexă a funcționării acestuia. Este necesar deci, să se facă o comparație între creșterea de preț a întrerupătorului echipat cu un sistem de monitorizare și diagnosticare și economia pe care o poate aduce un asemenea sistem în cursul duratei de viață a întrerupătorului. Obiectivul utilizatorilor, din punct de vedere economic este de a reduce la minimum posibil costul duratei de viață (CDV) al întrerupătorului, cost de obicei reprezentat prin ecuația:

$$CDV = CI + CM + CN + CE, \quad (6.1)$$

unde: CI este costul de instalare în care este cuprins şi costul sistemului de supraveghere şi diagnosticare, CM-costul intervalelor de mentenanţă programate (preventivă planificată), CN-costul mentenanţei neprogramate (corective), CE-costul datorat exploatării în serviciu.

De obicei mentenanţa programată este efectuată după anumite criterii cum ar fi: frecvenţa comutaţiilor la scurtcircuit, numărul de comutaţii la scurtcircuit şi durata serviciului. Bazat pe aceste criterii este realizat un plan de inspecţii şi revizii a întrerupătorului care cuprinde, [32]: inspecţia vizuală (lunară şi anuală); inspecţia extinsă (după 1000 de manevre sau după 3 ani); revizia (după 2000 manevre sau 6 ani în serviciu). In cadrul acestor activităţi, în cele mai multe cazuri se constată că starea tehnică a echipamentului este în general bună şi că operaţiile de repunere în funcţiune sunt în general limitate. In schimb, sistemul de monitorizare şi diagnosticare ne va da o informaţie mai precisă asupra gradului de uzură a echipamentului, ceea ce va permite reducerea frecvenţei intervenţiilor şi deci diminuarea costului mentenanţei programate.

Sistemul de monitorizare şi diagnosticare poate, de asemenea, influenţa costul mentenanţei corective necesară după apariţia unui defect. Acest lucru poate fi obţinut prin diferite căi şi anume:

- dacă sistemul semnalizează o anomalie care nu prezintă un pericol imediat, se pot lua măsurile necesare pentru scoaterea de sub tensiune a elementului defectabil asigurând continuitatea în alimentarea cu energie a consumatorilor, iar intervenţia asupra elementului se va face când costul este mimim;

- dacă un defect survine în timpul serviciului, sistemul de monitorizare şi diagnosticare permite modificarea condiţiilor de exploatare pentru a limita consecinţele defectului şi pentru a reduce timpul necesar localizării defectului.

De asemenea, sistemul de monitorizare şi diagnosticare poate avea o influenţă directă şi asupra costului de exploatare în serviciu. Spre exemplu, prin trecerea de la supravegherea instalaţiilor cu

personal, la modul de supraveghere fără personal, caz în care rezultă economii datorate cheltuielilor cu personalul de exploatare.

In [5], se arată că extinderea duratei intervalelor de mentenanţă periodice în funcţie de starea tehnică reală a echipamentelor conduce la o utilizare mai bună a personalului de exploatare şi a echipamentelor. Totodată, în [14], este subliniat că, costul duratei de viaţă poate ajunge la 1,5 ori preţul de vânzare al echipamentului de comutaţie pentru o durată de serviciu de 20 ani, iar în cazul utilizării sistemelor de monitorizare şi diagnosticare acest cost poate ajunge la maximum 0,5 ori preţul de vânzare al echipamentului.

Un alt avantaj al utilizării sistemelor de monitorizare şi diagnosticare, greu de cuantificat, dar care prezintă un interes deosebit este dat de posibilitatea realizării unei baze de date statistice referitoare la diverse defecte şi anomalii ale echipamentelor de comutaţie. Această bază de date va putea fi folosită de constructor pentru îmbunătăţirea fiabilităţii produselor, prin creşterea calităţii componentelor defectabile şi de către beneficiari, pentru achiziţionarea de echipament cît mai fiabil.

Se poate concluziona, că următoarele obiective sunt mai important de urmărit în cazul monitorizării şi diagnosticării tehnice:

- monitorizarea caracteristicilor funcţionale de bază ale echipamentului de comutaţie (întrerupătorului);
- detectarea promptă a schimbărilor caracteristicilor funcţionale în vederea prevenirii defectelor întrerupătorului;
- localizarea defectelor în cazul instalaţiilor capsulate;
- prevenirea unei mentenanţe inutile, în vederea înlăturării cauzelor de defect, provocate de o intervenţie defectuoasă;
- reducerea costurilui duratei de viaţă (CDV);
- mărirea duratei de viaţă a întrerupătoarelor;
- realizarea unei baze de date statistice, referitoare la defectele şi anomaliile întrerupătoarelor.

Trebuie arătat că utilizarea sistemelor de monitorizare şi diagnosticare nu va elimina în totalitate defectele echipamentelor supravegheate, existând întotdeauna o posibilitate mică de apariţie a unui defect cu evoluţie rapidă, sau a unui defect deosebit pe care

sistemul nu-l poate detecta deoarece anomalia care la precedat nu a fost prevăzută la proiectarea sistemului.

6.3. Defecte ale echipamentelor de comutaţie cu hexafluorură de sulf

Statistica defectelor. Pentru stabilirea principalilor parametri necesari în monitorizarea şi diagnosticarea tehnică trebuie mai întâi stabilite componentele responsabile de anomaliile şi defecţiunile întrerupătoarelor. Din datele statistice culese şi prelucrate de către Grupul de Lucru 13.06 al CIGRE, a rezultat următoarea situaţie prezentată în tabelele următoare (au fost considerate numai întrerupătoarele cu SF_6, în tehnică autopneumatică, cu tensiunea nominală de 72,5 kV şi mai mult), [11], [15], [16], [17].

După *consecinţele defectării*, pentru întrerupătoare, GL 13.06 al CIGRE s-a oprit doar la două categorii de defecte şi anume: majore (DM) şi minore (Dm).

Defectările majore corespund dispariţiei unei funcţii principale a întrerupătorului, necesitând scoaterea din funcţiune a acestuia, în timp ce defectările minore grupează toate celelalte defectări care pot fi eliminate mai târziu (cu ocazia lucrărilor planificate sau programate accidental).

Astfel se propune ca defectarea întrerupătorului să fie considerată ca majoră dacă întrerupătorul: nu anclanşează sau nu declanşează la comandă; nu întrerupe curentul sau se defectează la deschidere; nu stabileşte curentul sau se defectează la închidere; anclanşează sau declanşează fără comandă; se defectează ca urmare a unei amorsări la pământ, între faze sau între bornele aceleeaşi faze deschise; nu suportă curentul.

Ca defectări minore sunt considerate următoarele: întrerupătorul nu va anclanşa sau nu va declanşa la comandă; întrerupătorul nu va stabili sau nu va întrerupe curentul; pierderi de ulei şi/sau hexafluorură; modificarea caracteristicilor funcţionale.

Tab.6.1

Componente responsabile de defect	DM [%]	Dm [%]
Componente la tensiunea de serviciu	20,4	25,7
- camera de stingere (rupere)	12,5	8,5
- întrerupător auxiliar, rezistor	0,9	0,6
- izolaţia principală faţă de pământ	7,0	16,6
Elemente de control şi auxiliare	33,3	22,8
- circuitele de închidere, deschidere	11,6	1,2
- comutatoare auxiliare	7,3	2,1
- contactoare, relee, termostate, etc.	10,4	6,5
- dispozitivul de control a densităţii SF_6	4,0	13,0
Mecanismul de acţionare	42,1	46,1
- compresoare, pompe, etc.	15,2	20,1
- acumulatorul de energie	4,0	7,0
- elemente de control (neelectrice)	10,4	12,7
- dispozitive de comandă, amortizoare	7,9	4,8
- mecanism de transmitere	4,6	1,5
Alte componente	4,2	5,3

Notă: DM - defecte majore; Dm - defecte minore.

Tab.6.2

Caracterul defectelor minore	Dm [%]
Pierderi de ulei sau gaz la mecanismul de acţionare	32
Pierderi de SF_6 datorate coroziunii	14
Pierderi de SF_6 datorate altor cauze	22
Modificarea caracteristicilor funcţionale	17
Altele defecte	15

Tab.6.3

Ansamblurile responsabile Defecte majore	CTS [%]	CEC [%]	MA [%]	AC [%]	Total [%]
Nu închide la comandă	0,0	16,49	19,93	0,0	26,39
Nu deschide la comandă	0,62	4,97	4,34	0,0	9,93
Inchide fără comandă	0,0	0,31	0,62	0,0	0,93
Deschide fără comandă	1,25	2,17	3,42	0,31	7,15
Nu închide circuitul	0,62	0,62	0,93	0,0	2,17
Nu întrerupe curentul	2,49	0,0	0,31	0,31	3,11
Străpung. sau conturnarea izolației față de pământ	2,17	0,0	0,0	0,0	2,17
Străpung. sau` conturnarea zolației între poli	0,62	0,0	0,0	0,0	0,62
Străpung. sau cont. izol. în lungul polului (int.)	3,11	0,0	0,31	0,0	3,42
Străpung. sau cont. izol. în lungul polului (ext.)	1,55	0,0	0,31	0,0	1,87
Blocarea în poziția închis sau deschis	4,66	7,45	15,5	0,31	27,95
Alte tipuri de defect	2,77	1,57	6,54	3,41	14,29
Total	19,9	33,6	42,2	4,3	100

Notă: CTS-componente la tensiunea de serviciu; CEC-circuitele electrice de control și auxiliare; MA-mecanismul de acționare; AC-alte componente.

Tab.6.4

Natura și locul de manifestare al defectelor	DM [%]	Dm [%]
Mecanică în mecanismul de acționare	40	40
Mecanică în alte părți ale întrerupătorului	11	11
Electrică în circuitul principal	12	1
Electrică în circuitele de control și aux.	28	11
Pierderi de SF_6 în sistemul de gaz	9	37

Tab.6.5

Defecte electrice de izolaţie (străpungeri, conturnări)	Total [%]	IC [%]	IN [%]
Defectarea izolaţiei faţă de pământ	30,43	21,73	8,70
Defectarea izolaţiei între poli	8,70	0,0	8,70
Defecte externe de izolaţie în lungul polului	43,48	4,35	39,13
Defecte interne de izolaţie în lungul polului	17,39	4,35	13,04
Total	100	30,43	69,57

Notă: IC - întrerupătoare capsulate în anvelopă metalică;
IN - întrerupătoare necapsulate.

Rezultatele obţinute trebuie analizate în concordanţă cu funcţiile pe care trebuie să le îndeplinească întrerupătoarelor şi anume: stabileşte, menţine şi întrerupe curentul (camerele de stingere); izolaţia electrică; acţionarea mecanică (mecanismul de acţionare); funcţii de control şi auxiliare (circuitele electrice de control şi auxiliare); etanşeitatea sistemului cu gaz SF_6. In paranteze au fost trecute subansamblurile constructive, în relaţie cu funcţia pe care o îndeplineşte. Funcţiile "izolaţia electrică" şi "etanşeitatea sistemului cu gaz SF_6" sunt date de mai multe subansambluri constructive.

Camerele de stingere. Deşi camerele de stingere sunt responsabile de 12,5% din DM şi de 8,5% din Dm, funcţia principală "de a întrerupe" nu este considerată critică datorită numărului mic de defecte majore de tipul "nu închide circuitul" sau "nu întrerupe curentul" (Tab.6.1 şi Tab.6.3). Altfel spus, riscul ca un întrerupător să nu întrerupă curentul este în mai mare măsură datorat mecanismului de acţionare şi circuitelor de control şi auxiliare ("nu deschide la comandă"), decât riscul datorat camerelor de stingere ("nu întrerupe curentul").

In mod evident, dezvoltarea şi testarea calităţii în domeniul stabilirii şi întreruperii curenţilor a atins un nivel deosebit de înalt,

va fi deci necesară menținerea acestui nivel prin continuarea programelor de testare și verificare.

Majoritatea defectelor majore aflate sub responsabilitatea camerelor de stingere (unităților de întrerupere), sunt străpungeri sau conturnări electrice ce vor fi tratate în paragraful următor.

Izolația electrică. In Tab.6.5 este indicată rata defectelor de izolație pentru întrerupătoarele aflate în carcasă metalică sau nemetalică.

Defectele de străpungere sau conturnare electrică, au o rată de 0,56 la 1000 ani-întrerupător. Rata defectelor de străpungere electrică pentru întrerupătoarele în carcasă metalică este chiar mai mică de 0,49 la 1000 ani-întrerupător.

Cu toate că numărul de străpungeri electrice este relativ scăzut pentru întrerupătoarele în carcasă metalică, există un interes deosebit pentru tehnicile de diagnosticare în acest domeniu, întrucât o străpungere electrică într-o instalație capsulată în hexafluorură este considerat ca un defect foarte serios, datorită consecințelor defectului asupra întregii instalații capsulate și a timpului mare de reparație.

Datorită acestui fapt, fabricanții și respectiv utilizatorii de echipament sunt foarte interesați de tehnicile de monitorizare și diagnosticare care privesc detectarea descărcărilor parțiale și respectiv localizarea defectului.

Mecanismul de acționare. Trei sferturi (75,4%) din defectele majore reliefate sunt datorate mecanismului de acționare și circuitelor electrice de control și auxiliare, (Tab.6.1). Cele mai importante moduri de defectare sunt: "nu deschide la comandă" (9,31%), "nu închide la comandă" (26,39%), și "blocare" (22,98%), (Tab.6.3).

Mecanismul de acționare este responsabil de cel mai mare procent de defecte atât majore cât și minore. Cele mai implicate componente sunt compresoarele, pompele, motoarele și conductele aferente. Majoritatea defectelor minore sunt de tipul "pierderi de gaz sau ulei" (Tab.6.2).

Mecanismul de acționare este și va fi în continuare un important domeniu atât pentru perfecționarea controlului calității cât

şi pentru dezvoltarea şi aplicarea monitorizării şi diagnosticării tehnice.

Circuitele electrice de control şi auxiliare. Circuitele electrice de control şi auxiliare sunt responsabile de o treime din defectele majore reliefate, rata defectelor majore la aceste circuite fiind de 2,4 la 1000 ani-întrerupător. Cele mai multe dintre ele aparţin categoriei "nu deschide la comandă" sau "nu închide la comandă".

Deoarece pe plan mondial au fost promovate întrerupătoare moderne cu SF_6 în tehnică autopneumatică, fără o îmbunătăţire a fiabilităţii circuitelor de control şi auxiliare este necesară o atenţie deosebită în privinţa dezvoltării lor sub acest aspect.

Din punct de vedere al fiabilităţii este recomandat să fie simplificate circuitele electrice de control şi auxiliare şi să se reducă numărul de elemente în circuitele vitale pentru reducerea riscului de blocare a întrerupătorului.

Etanşeitatea sistemului cu gaz SF_6. Se observă că 9% din defectele majore, respectiv 37% din cele minore sunt sub incidenţa etanşeităţii sistemului cu gaz SF_6 (Tab.6.4). Se poate deduce că rata defectelor minore este destul de ridicată, iar procentul defectelor majore deşi pare scăzut pentru un întrerupător dotat cu dispozitiv de supraveghere a densităţii gazului, este inacceptabilă o asemenea situaţie. Este deci necesară dezvoltarea atât a sistemelor de etanşare cât şi a sistemelor de urmărire a densităţii gazului.

6.4. Parametri pentru monitorizare şi diagnosticare

6.4.1. Generalităţi

Parametrii ce trebuie consideraţi pentru un sistem de supraveghere şi diagnosticare, vor fi discutaţi pe funcţie sau subansamblu, după cum s-a arătat în ultimele paragrafe. Atât parametrii folosiţi în mod curent [9], [33], cât şi cei datoraţi noii dezvoltări a tehnicilor de diagnosticare, vor fi trataţi sub aspectul utilităţii, experienţei cunoscute şi fezabilităţii tehnice şi economice.

In Tab.6.6 este prezentată o vedere generală asupra prezenței în exploatare a tehnicilor de monitorizare și diagnosticare uzuale, [15], (prezența în exploatare, într-un grad mai mic sau mai mare, a acestor tehnici este evaluată în tabel plecând de la *, la ****).

Tab.6.6

	Inspecție	Diag.	Monit.
Funcțiile principale			
- poziția închis/deschis			****
- calitatea izolației	*	***	*
- rezistența circuitului		****	
- creșterea temperaturii	***		
- nesimultaneitatea polilor		**	***
- timpul de acționare		****	*
- numărul de acționări	****		*
- sumarea curenților întrerupți			*
Mediul electroizolant și de stingere			
- presiunea	**		**
- densitatea			****
- calitatea SF_6		****	
- calitatea aerului comprimat	*	**	
- nivelul uleiului	****		
- calitatea uleiului		***	
- scurgeri	**	***	*
Mecanism de acționare			
- presiune	*		****
- energia acumulată		**	*
- nivelul uleiului	****		**
- scurgeri	****		
- s(t) și v(t) la acționare		**	*
- forța de acționare		*	
- comportarea amortizoarelor		*	
- căderea de presiune în timpul acționării		***	
- numărul de porniri ale pompei	**		*
- timp reîncărcare pompă		**	**
- timp total funcționare pompă	**		*

Tab.6.6 (continuare)

Circuite el. de control și auxiliare			
- alimentarea cir. auxiliare		**	***
- supraveghere bobine		**	**
- blocaj la închidere		**	***
- blocaj la reînchidere		*	***
- blocaj general		*	**
- semnal de avertizare		**	**
- circuite de încălzire	***	**	
- calitatea izolației		**	
Diverse			
- coroziune	****		
- poluare	****		
- aspectul exterior	**		

6.4.2. Camerele de stingere

O primă problemă, de importanță deosebită, a camerelor de stingere o reprezintă anduranța electrică a acestora. Anduranța electrică este apreciată prin numărul maxim de întreruperi la o anumită valoare a curenților întrerupți, care duc la uzura maximă a contactelor de arc, respectiv a duzelor de suflaj. Este important, în același context, și cunoașterea timpilor de existență a arcului electric de deconectare dintre contactele întrerupătorului.

Arcul electric dezvoltat între contactele întrerupătorului în momentul întreruperii unui curent are o mare influența asupra contactelor de rupere 1 (fix), 2 (mobil) și asupra duzei de suflaj 3 ale acestuia, Fig.6.1. Eroziunea acestor elemente este cu atât mai pronunțată cu cât intensitatea curentului deconectat este mai mare respectiv energia dezvoltată în coloana arcului electric este mai importantă. Uzura duzei de suflaj este totuși scăzută asigurând o bună funcționare pe durata de exploatare a întrerupătorului, dar eroziunea electrică a contactelor de rupere trebuie să fie supravegheată, deoarece determină limitele utilizării întrerupătorului.

De obicei, contactul fix de rupere capătă o eroziune mai mare decât contactul mobil de rupere este precizat în [7].

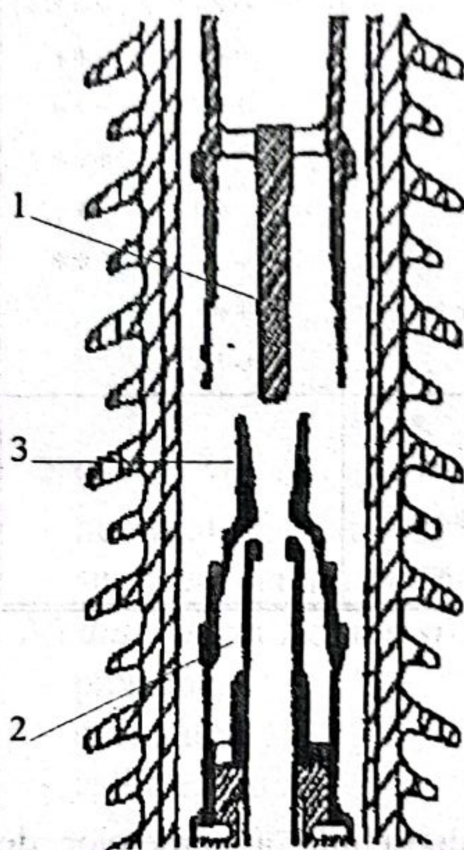


Fig.6.1
Cameră de stingere

Electroeroziunea contactelor "m", dată în [mg] se poate calcula cu relația, [24]:

$$m = c \cdot I^{d \cdot t}, \qquad (6.2)$$

unde: I, reprezintă valoarea efectivă a curentului întrerupt, t-durata de existență a arcului electric iar c și d constante de material (pentru cupru-wolfram, c = 1,81 și d = 0,274).

Timpul de existență al arcului electric este dificil de măsurat în exploatare și de aceea, pentru urmărirea electroeroziunii contactelor întrerupătoarelor se recomandă utilizarea relației, [15], [7]:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot I_i \leq K, \qquad (6.3)$$

unde: I_i este valoarea efectivă a curentului întrerupt la deconectarea i, α_i-constantă ce depinde de valoarea efectivă a curentului întrerupt iar K-constantă, a cărei valoare este specifică fiecărui tip de întrerupător și la a cărei atingere este indicată schimbarea contactelor (K = 420 kA, în cazul întrerupătorului cu hexafluorură de sulf tip H14P40, [32]).

Conform diagramei de mentenanță, specificată de către fabricantul de echipament, Fig.6.2, valoarea coeficientului α_i depinde de curentul deconectat conform relației:

$$\ln \alpha_i = a \cdot \ln I_i + b, \qquad (6.4)$$

unde: a şi b reprezintă constante dependente de tipul de întrerupător.

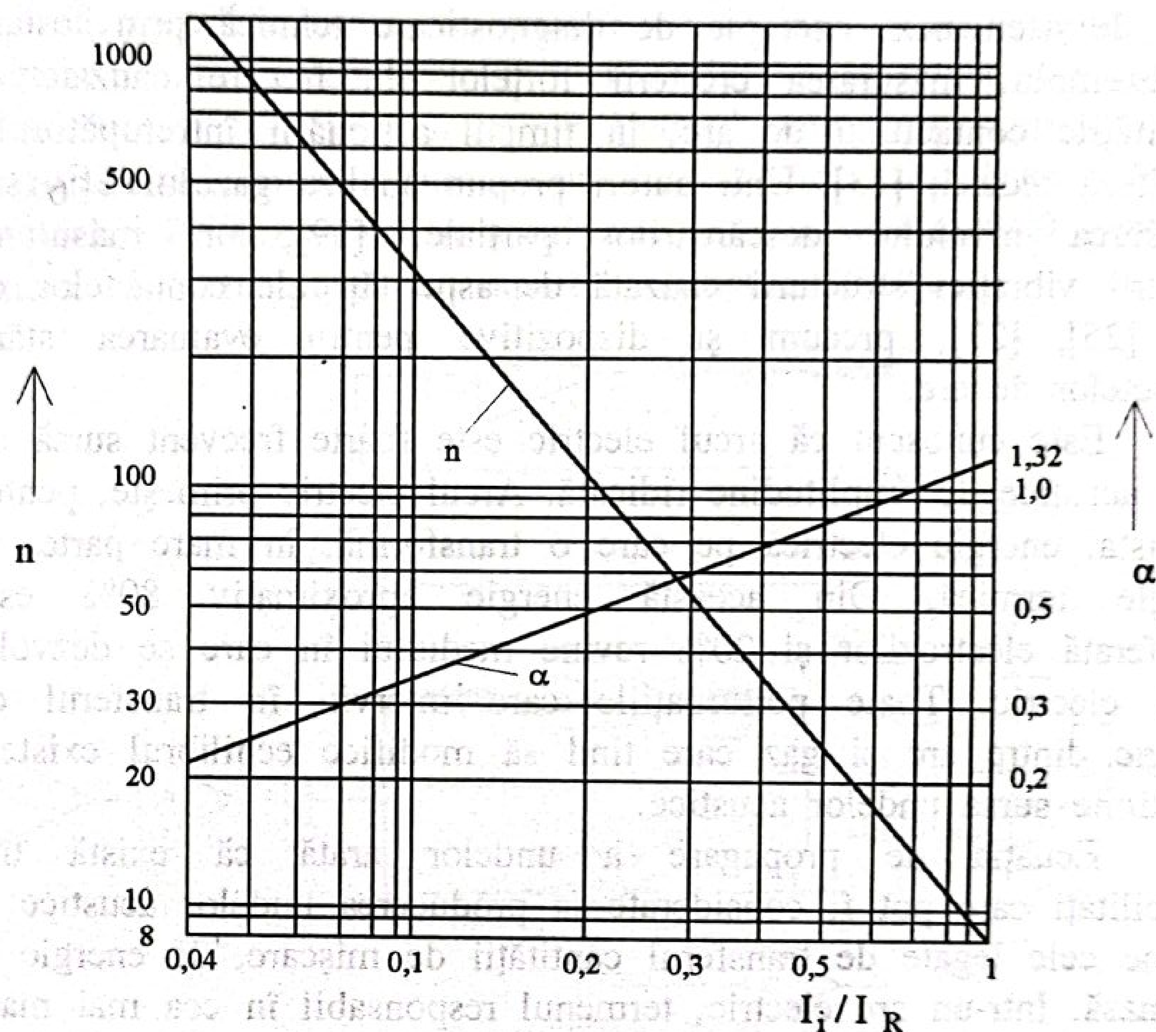


Fig.6.2

Diagrama de mentenanţă a întrerupătoarelor cu SF_6 tip H14P40, H17P40 fabricate de Electroputere Craiova

In [7] este propusă supravegherea curenţilor întrerupţi pe diferite domenii, exprimând valoarea sumelor intensităţilor curenţilor întrerupţi în kA şi kA^2. Spre exemplu, pentru un întrerupător având curentul nominal de 2000 A, suma n_1 a intensităţilor curenţilor întrerupţi exprimată în kA se face pentru curenţi de deconectare până la 5 kA, iar peste această valoare până la curentul de rupere suma n_2 se face în kA^2. Sumele obţinute estimează valoarea uzurii contactelor (suma în kA^2 devenind preponderentă pentru valori mari

ale curenţilor întrerupţi) astfel că activitatea de mentenanţă trebuie efectuată când valoarea limită n_1 sau n_2 este atinsă.

In afară de aceste tehnici de urmărire continuă, literatura oferă de asemenea, exemple de diagnosticare tehnică prin testare. De exemplu, măsurarea creşterii forţelor de frecare cauzate de asperităţile contactului de arc, în timpul acţionării întrerupătorului cu viteză redusă, [13]. Unii autori propun analiza gazului SF_6 sau măsurarea nivelului descărcărilor parţiale, [19], ori măsurarea creşterii vibraţiei structurii cauzată de asperităţi ale contactelor de arc, [25], [27], precum şi dispozitive pentru evaluarea stării contactelor de arc.

Este cunoscut că arcul electric este foarte frecvent sursă de unde acustice de amplitudine ridicată. Arcul electric primeşte, pentru a exista, energie electrică pe care o transformă, în mare parte, în energie termică. Din această energie aproximativ 80% este transferată electrozilor şi 20% revine mediului în care se dezvoltă arcul electric. Toate perturbaţiile care intervin în transferul de energie dintre arc şi gaz care tind să modifice echilibrul existent constituie sursa undelor acustice.

Ecuaţia de propagare a undelor arată că există trei posibilităţi care pot fi considerate la producerea undelor acustice şi anume cele legate de transferul cantităţii de mişcare, de energie şi de masă. Intr-un arc electric, termenul responsabil în cea mai mare parte de producerea undelor acustice este cel datorat transferului de energie.

Amplitudinea, A_a, a unei unde acustice într-un punct "r", este dată de relaţia, [34]:

$$A_a = \frac{p_0}{T_0} \cdot \frac{\gamma - 1}{c^2} \cdot \frac{dP}{dt}, \tag{6.5}$$

unde: P este puterea dezvoltată în arc, c-viteza sunetului, γ-coeficientul de compresibilitate adiabatică, iar p_0, T_0-presiunea şi respectiv temperatura iniţială a gazului.

Schema electrică a instalației din Fig.6.3, permite verificarea teoriei undelor acustice în cazul unui arc electric. Instalația cuprinde sursa de curent S, cu caracteristică rectangulară, generatorul de funcții G, care furnizează un semnal sinusoidal sau în impulsuri cu o durată variabilă. Semnalele proporționale cu tensiunea și curentul prin arc pot fi observate direct cu ajutorul unui osciloscop sau pot fi multiplicate pentru a furniza un semnal proporțional cu puterea instantanee, P, dezvoltată în arcul electric. Un derivator D permite obținerea derivatei puterii în raport cu timpul, dP/dt.

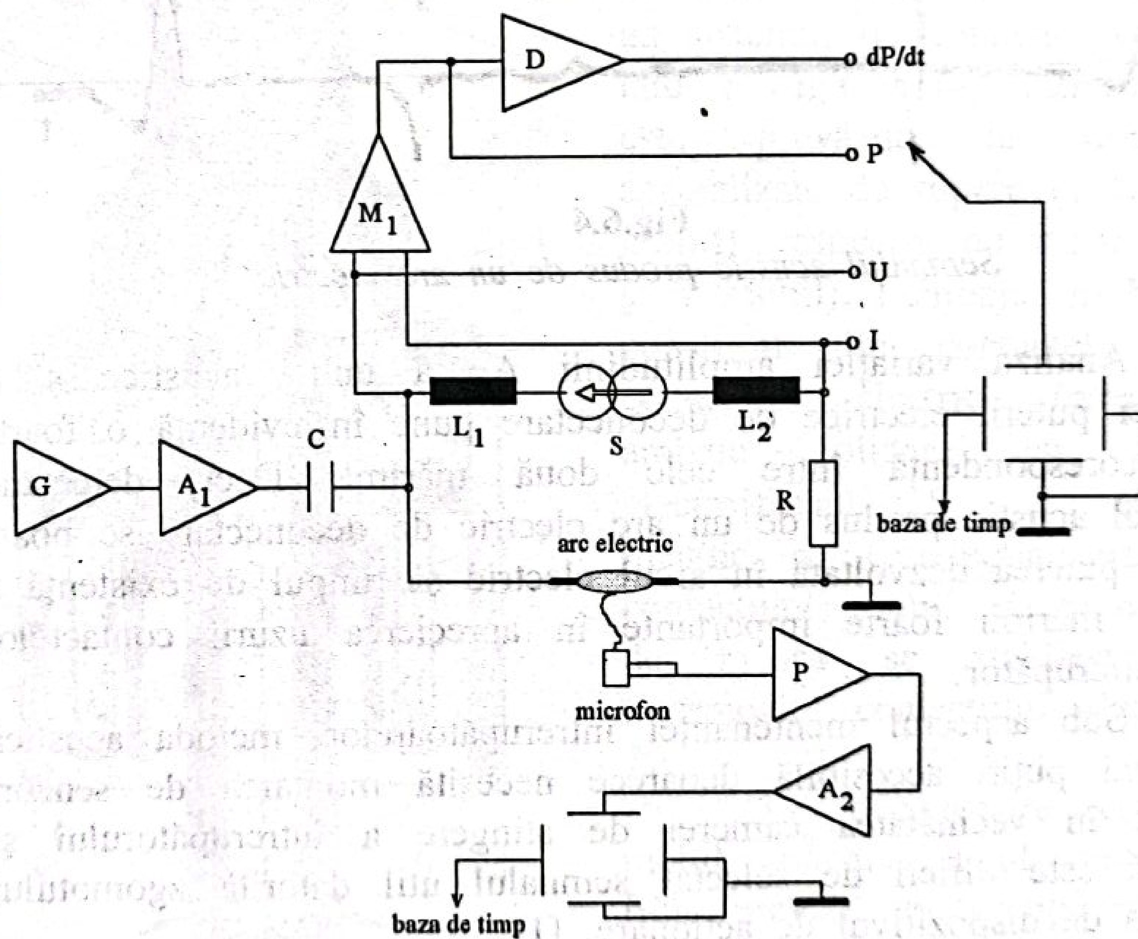


Fig.6.3
Schema electrică a instalației pentru verificarea teoriei undelor acustice în cazul unui arc electric

In Fig.6.4 este prezentată variația în timp a curentului prin arcul electric, a derivatei puterii instantanee și a semnalului acustic produs de arcul electric în cazul unui curent pulsatoriu, i.

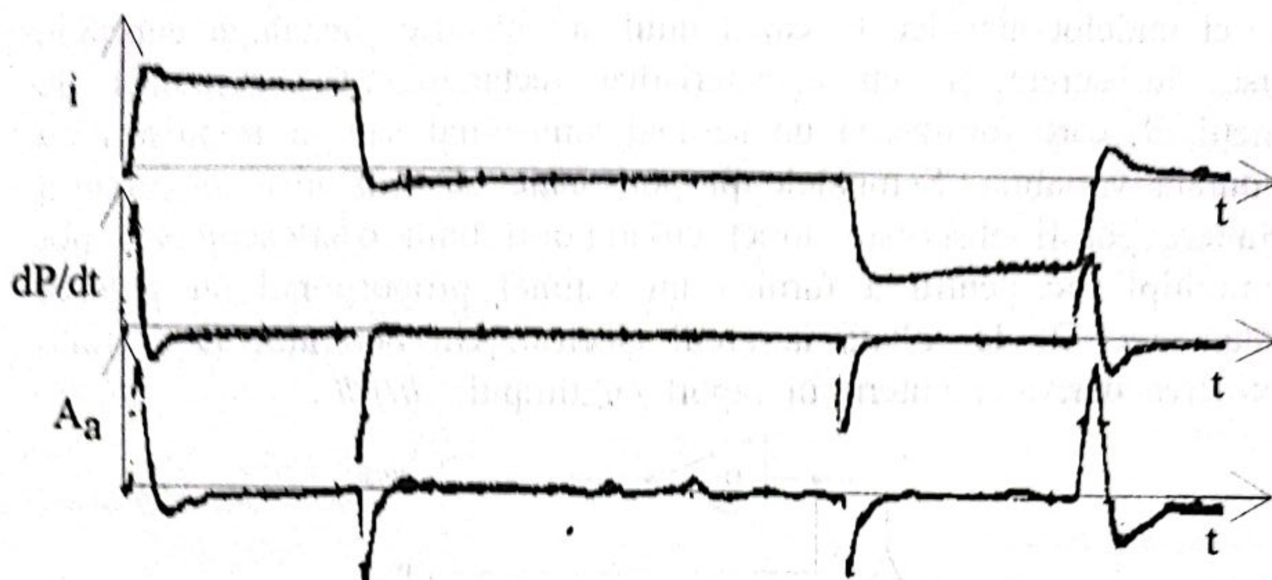


Fig.6.4
Semnalul acustic produs de un arc electric

Analiza variației amplitudinii A_a a undei acustice și a derivatei puterii electrice de deconectare pune în evidență o foarte bună corespondență între cele două mărimi. Deci, detectând semnalul acustic produs de un arc electric de deconectare se poate aprecia puterea dezvoltată în arcul electric și timpul de existență a arcului, mărimi foarte importante în aprecierea uzurii contactelor unui întrerupător.

Sub aspectul mentenanței întrerupătoarelor, metoda acustică este mai puțin accesibilă deoarece necesită montarea de senzori acustici în vecinătatea camerei de stingere a întrerupătorului și totodată este dificil de selectat semnalul util datorită zgomotului introdus de dispozitivul de acționare, [1].

Unele din tehnicile amintite în aprecierea anduranței electrice sunt încă experimentale și îndepărtate de practica uzuală inginerească.

Rezistența electrică a contactelor principale și respectiv a căilor de curent, reprezintă alți parametri importanți în activitatea de monitorizare și diagnosticare. In general, se utilizează tehnica de testare a contactelor electrice prin măsurarea rezistenței de contact dintre contactele principale, cu întrerupătorul în poziție închisă (test de diagnostic).

In cazul echipamentelor de comutaţie care prezintă sistemul de contacte specializate (de lucru şi de rupere) conectate în paralel este importantă cunoaşterea rezistenţei de contact dinamice, [2], [12], [25], [27].

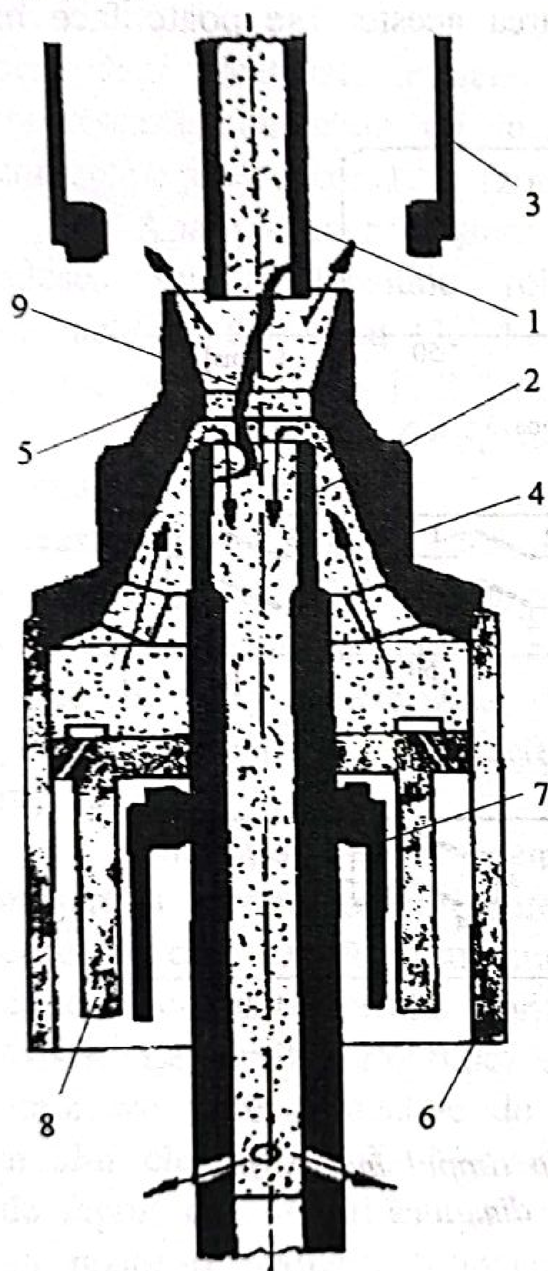


Fig.6.5
Secţiune prin camera de stingere

Echipamentele de comutaţie cu hexafluorură de sulf realizate în tehnică autopneumatică, de tipul H14P40 şi H17P40, fabricate la Electroputere Craiova, au sistemul de contacte reprezentate în Fig.6.5, [4]. Intrerupătorul este prevăzut cu contactele specializate de rupere (1 fix şi 2 mobil), respectiv de lucru (3 fix şi 4 mobil). Echipajul mobil este constituit din contactele 2, 4 conectate electric între ele, ambele solidare cu ajutajul electroizolant 5 şi cilindrul metalic 6. Conducţia între tija contactului mobil şi borna fixă de racord se stabileşte prin intermediul contactului alunecător 7.

La deconectare echipajul mobil coboară, arcul electric 9 fiind preluat, în condiţii normale de contactele de rupere 1, 2. Gazul SF_6, comprimat între cilindrul mobil 6 şi pistonul 8 exercită, prin ajutajul 5, un suflaj longitudinal bilateral sub acţiunea căruia se obţine stingerea arcului electric.

Acţiunea arcului electric 9, se concretizează prin electroeroziunea contactelor de rupere 1 şi 2. Se poate ajunge

astfel, la situaţia nepermisă ca la deconectare secvenţa de deschidere a contactelor să fie schimbată, arcul electric fiind preluat de contactele de lucru 3, 4.

Evitarea acestui fapt se poate face prin supravegherea rezistenţei de contact dinamice. Măsurarea acesteia se poate face în

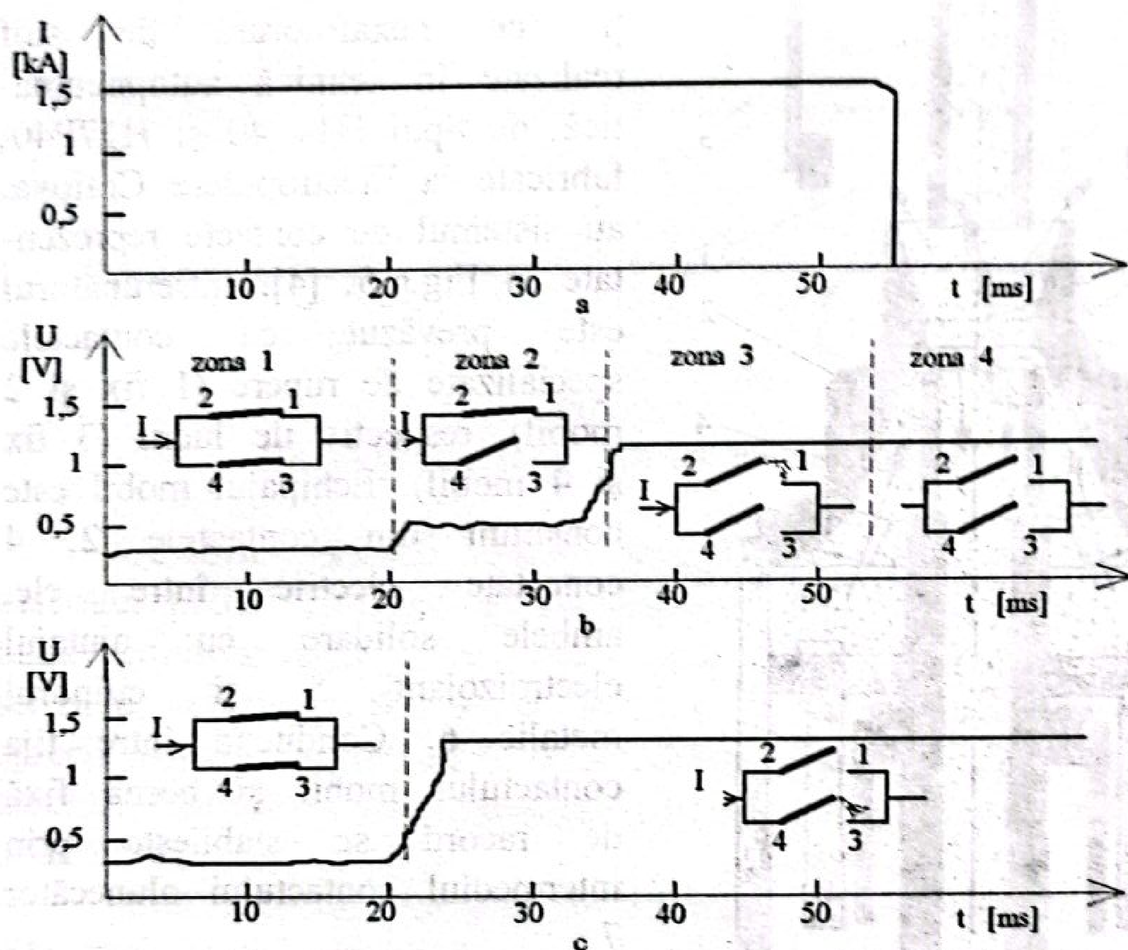


Fig.6.6

Evoluţia curentului şi a tensiunii în timpul încercărilor de rezistenţă de contact dinamică

timpul unei manevre de deschidere a întrerupătorului, prin întrerupător trecând un curent $I \in (100A, I_n)$, unde I_n este curentul nominal al întrerupătorului.

In Fig.6.6a şi Fig.6.6b sunt prezentate formele de undă ale curentului şi căderii de tensiune pe sistemul de contacte al întrerupătorului testat în timpul unei manevre de deschidere, [2].

Atât timp cât întrerupătorul este închis şi în poziţie staţionară curentul I străbate rezistenţa de contact a sistemului de contacte şi produce o cădere de tensiune U pe contacte, de ordinul a câtorva zeci de mV. Când întrerupătorul începe să se deschidă, tensiunea U rămâne în continuare la aceleaşi valori cu mici perturbaţii aleatoare. In acest timp, un procent ridicat al curentului traversează contactele de lucru 3 şi 4, o mică parte parcurgând contactele de rupere 1, 2 (zona 1, Fig.6.6b).

Apariţia unor creşteri discontinui ale tensiunii ce culminează adesea cu o tensiune relativ ridicată marchează deschiderea contactelor de lucru 3, 4 şi trecerea curentului I numai prin contactele de rupere 1, 2 (zona 2, Fig.6.6b).

Zona 3, Fig.6.6b, este marcată de momentul deschiderii contactelor de rupere 1, 2 şi momentul stingerii arcului electric. Pe această zonă nivelul tensiunii este mult mai mare (căderea de tensiune pe arc), pe oscilogramă fiind limitat nivelul de tensiune din considerente de protecţie a aparatelor de înregistrare. Zona 4, Fig.6.6b, este caracterizată de absenţa curentului I şi aflarea în poziţia deschis a contactelor de sarcină 3, 4 şi a celor de rupere 1, 2.

Intervalul de timp care caracterizează zona 2, Fig.6.6b, dă o măsură a electroeroziunii suferite de contactele de rupere 1, 2. În cazul în care există o suprapunere în funcţionarea celor două tipuri de contacte şi o ordine normală a deschiderii acestora zona 2 va exista. La limită, Fig.6.6c, se va ajunge ca arcul electric să se amorseze între contactele de lucru 3, 4, fapt ce face ca stingerea arcului electric să fie îngreunată dacă nu imposibilă, ţinând seama de faptul că suflajul cu gaz necesar pentru stingerea arcului electric nu poate fi realizat. Amorsarea arcului electric între contactele de lucru va avea ca rezultat electroeroziunea puternică a contactelor de lucru şi deci compromiterea funcţionării în continuare a întrerupătorului.

Măsurarea rezistenţei de contact dinamice permite aprecierea gradului de electroeroziune a contactelor de rupere. Cunoscând viteza de deplasare a contactelor mobile este de câţiva m/s, intervalul de timp dintre momentele deschiderii contactelor de lucru,

respectiv a celor de rupere şi cantitatea de metal supusă electroeroziunii în urma unei deconectări în sarcină sau la un curent de defect, se poate aprecia numărul aproximativ de deconectări până în momentul necesar realizării lucrărilor de mentenanţă la întrerupător.

In literatură se fac referiri la utilizarea tehnicii infraroşu, analiza gazului SF_6 şi la măsurarea vibraţiilor acustice ca posibilităţi de detectare a contactelor electrice deteriorate, [7], [11], [27]. Unii autori menţionează posibilitatea aplicării de senzori de temperatura pe anvelopa metalică a întrerupătoarelor capsulate.

Au fost căutaţi şi alţi parametri ce au influenţă asupra posibilităţilor de întrerupere ale întrerupătorului. Ca exemplu, ar fi presiunea dinamică a gazului SF_6 în camera de stingere şi emisia luminoasă a arcului, [18].

Metodele optice utilizate în studiul arcului electric constau în a analiza fie lumina emisă de arc, fie perturbaţia la care este supus un fascicol luminos (absorţie, defazaj, deviaţie) în cursul traversării plasmei. Metoda optică utilizând lumina emisă de arcul electric ne poate arăta poziţia plasmei şi a componentelor sale (ioni, electroni) şi ne permite aprecierea timpului de existenţă a arcului electric. Cunoaşterea prezenţei şi a ponderii vaporilor metalici de cupru, tungsram sau wolfram (metale ce intră în construcţia contactelor de rupere ale întrerupătorelor) ne oferă informaţii despre electroeroziunea contactelor întrerupătorului, [8].

In [1], este apreciat că pentru moment, metodele optice nu pot fi aplicate în cadrul activităţii de mentenanţă a întrerupătoarelor deoarece nu există posibilitatea de vizionare directă a coloanei arcului electric, iar montarea de traductoare optice în cazul anumitor metode optice este destul de dificilă.

Aceste metode rămân metode de laborator utilizate pentru aprecierea: calităţii mediului electroizolant şi de stingere a arcului electric (hexafluorură de sulf, ulei etc.), contactelor şi materialelor contactelor întrerupătoarelor.

Există o metodă, metoda electromagnetică, care permite diagnosticul spaţio/temporal al mişcării coloanei arcului electric, metodă care se bazează pe măsurarea fluxului electromagnetic emis

de un circuit ce cuprinde şi arcul electric, [10]. Metoda utilizează un traductor electromagnetic, denumit planimetru, ce trebuie să creeze un câmp magnetic uniform în volumul de expansiune a arcului. Planimetrul este realizat dintr-un ansamblu de trei perechi de bobine de tip Helmholtz. O pereche de bobine Helmholtz este constituită din doua bobine situate pe acelaşi ax, ce au o lăţime şi grosime redusă faţă de raza lor şi sunt dispuse în două plane paralele la o distanţa egală cu raza lor.

Multe din rezultatele acestor tehnici experimentale nu sunt întru totul cele aşteptate, dar îmbunătăţirea tehnicii testelor de diagnostic utilizate în mod curent (de exemplu prin punerea într-o bancă de date a rezultatelor pentru compararea cu istoricul măsurătorii şi curbele de calcul, [21]) va duce la găsirea unor metode cu aplicaţie mai largă.

6.4.3. Izolaţia electrică

Teste de calitate. In mod curent utilizarea tehnicilor de diagnosticare a calităţii izolaţiei electrice apelează la teste de diagnostic cum ar fi: conţinutul de umiditate din ulei, aer sau SF_6, tensiunea de străpungere a uleiului, tangenta unghiului de pierderi şi nivelul decărcărilor parţiale, în cazul întrerupătoarelor capsulate.

Intrerupătoarele cu SF_6 sunt foarte mult influenţate în funcţionare de calitatea gazului. Calitatea gazului este influenţată de scăparile de gaz, ce au drept rezultat pătrunderea umidităţii şi de asemenea datorită intervenţiilor (deschiderea) la întrerupător în condiţii improprii, dar nu cu acelaşi efect ca pătrunderea umidităţii. Testarea conţinutului de umiditate a gazului după intervenţii la întrerupător şi după scurgeri de gaz, sunt strict recomandate de fabricant.

Teste cantitative. Cantitatea uleiului este verificată în timpul inspecţiilor periodice a întrerupătorului (nivelul, pierderile de ulei). Cantitatea de gaz SF_6 este supravegheată cu ajutorul monitorului de de densitate (presostate compensate cu temperatura).

Dacă pierderile de ulei duc la scăderea cantității uleiului sub un minim, acest lucru este fatal pentru întrerupător, la fel și în cazul piederilor de SF_6 mai ales în cazul întrerupătoarelor cu o singură presiune. Circumstanțele apariției pierderilor mari și rapide de fluid sunt într-o măsură mai mică sau mai mare datorate proiectării (ruperea sau spargerea izolației, a unor părți metalice, conducte). Cu toate acestea nivelul uleiului este verificat o dată la câteva săptămâni, iar densitatea este supravegheată continuu.

Descărcări parțiale. De obicei numărul defectelor de izolație (străpungeri, conturnări) este redus, dar impactul acestor defecte este deosebit de mare când întrerupătorul este integrat într-o instalație capsulată. Multe lucrări, printre care raportul CIGRE al GL 23.10, [20], arată interesul crescut față de dezvoltarea monitorizării și a tehnicilor de diagnosticare în domeniul instalațiilor capsulate în SF_6.

Descărcările parțiale în aceste instalații sunt datorate imperfecțiunilor constructive (goluri), pierderilor electrice în părțile metalice, cum sunt ecranele, ca și asperităților de pe conductoare.

Pot fi amintite următoarele metode pentru detectarea descărcărilor parțiale: emisia acustică, compoziția SF_6, emisia luminoasă, potențiale crescute, câmp electric pulsatoriu, etc. sau o combinație a acestor tehnici de diagnosticare.

Detecția descărcărilor parțiale este un prim fapt, iar localizarea descărcărilor parțiale și extragerea de informații fără perturbații de la senzorii de măsurare este un alt lucru destul de dificil de realizat. Nevoia de a căuta o tehnică de localizare a descărcărilor parțiale mai bună decât punerea la pământ, depinde de numărul de străpungeri dielectrice. Numărul mic al ratei defectelor la întrerupătoarele capsulate în perioada de serviciu nu explică necesitatea complicării tehnicii de detecție și localizare a descărcărilor parțiale. Totuși poate fi posibil, deși rata de defectare a dielectricului și în alte compartimente importante ale instalațiilor capsulate este redusă, să fie dezvoltată tehnica localizării descărcărilor parțiale pentru a crește fiabilitatea și respectiv fezabilitatea economică a instalațiilor.

Localizarea defectului. O cale normală de a localiza defectele electrice de izolaţie în instalaţiile capsulate este de a analiza semnalele electrice de la releele de protecţie, şi cele înregistrate în timpul desfăşurării evenimentelor. Mai mult analiza gazului SF_6 şi în special monitorizarea presiunii la comutaţie sau a densităţii ne oferă informaţii care pot fi evaluate. Unii autori implementează senzori optici pentru detecţia apariţiei descărcărilor electrice şi pentru localizarea lor.

In literatură sunt prezentate tehnici sofisticate pentru detecţia descărcărilor parţiale, de exemplu: optice, de detecţie a creşterii temperaturii, de detecţie a vibraţiilor acustice, magnetice şi tehnici de detectare a curentului de punere la pământ, ce sunt menţionate şi ca posibile tehnici de localizare a defectelor.

Tehnicile comune ca şi noile tehnici, vor fi utilizate împreună pentru monitorizarea instalaţiilor capsulate, astfel ca informaţia asupra parametrilor urmăriţi să fie obţinută pa durata desfăşurării defectului.

6.4.4. Mecanismul de acţionare

Numărul de acţionări. Cel mai important parametru privind starea tehnică a mecanismului de acţionare al întrerupătorului este numărul de acţionări. La toate tipurile de întrerupătoare implementate în instalaţiile electrice, pe lista activităţilor ce trebuie realizate la inspecţii, este trecută şi verificarea numărului de acţionări a întrerupătorului.

Timpul de acţionare. Al doilea parametru important este timpul de acţionare. Toţi utilizatorii consideră că timpul de acţionare este acţiunea cea mai importantă a testelor de diagnosticare. Unii utilizatori folosesc pentru monitorizare şi viteza de deplasare a tijelor mobile (Tab.6.6), iar un număr mai mic de utilizatori cosideră şi forţa de acţionare.

De asemenea şi comportamentul amortizoarelor este uneori verificat.

In acest domeniu al tehnicilor de diagnosticare utilizatorii caută echipamente care să fie capabile: să reducă timpul necesar pentru testarea întrerupătorului; să obţină direct rezultatele de la măsurători; de a avea posibilitatea să compare aceste rezultate cu cele statistice; să ofere o cantitate mare de informaţii (să avem în acelaşi timp informaţii cu privire la: arcul electric din camerele de stingere, cursa contactului mobil, viteza acestuia, ciclul complet I-D-I), să aibă posibilitatea de testare a întrerupătorului în funcţiune (serviciu). O aplicaţie care ar fi interesantă este cea legată de momentul când are loc acţionarea întrerupătorului după o lungă perioadă fără acţionare mecanică.

In viitor se va continua monitorizarea timpului de acţionare sau cursa şi viteza tijei mobile de contact. Este necesar a se asigura o acurateţe a măsurării timpului de acţionare, obţinută prin diverse tehnici utilizate, de exemplu: cu senzori optici, tehnica în cod bar, cu contacte auxiliare speciale, potenţiometre. Este propusă şi utilizarea de fibre optice în camera de stingere pentru a monitoriza printe alţi parametri şi timpul de arc, [18], iar în combinaţie cu evoluţia curentului prin bobinele de închidere/deschidere această tehnică poate fi utilizată la monitorizarea timpului de închidere şi deschidere.

Niveluri şi presiuni. Al treilea grup de parametri importanţi ai mecanismului de acţionare sunt: nivelul uleiului, presiunea hidraulică a uleiului şi presiunea amestecului gaz/aer. Mulţi utilizatori monitorizează nivelurile de presiune verificând în cadrul inspecţiilor nivelul uleiului şi al pierderilor. In alte cazuri se aleg pentru monitorizare energia stocată şi presiunea de picurare a uleiului.

In literatură sunt descrise sisteme de monitorizare care controlează comportamentul dinamic al fluidelor în mecanismul de acţionare şi în camera de stingere.

Pompe şi compresoare. A patra categorie de parametri sunt numărul de acţionări ale pompelor şi compresoarelor (motoarelor), timpul de reîncărcare şi timpul total de funcţionare. Utilizatorii se informează cu privire la aceşti parametri prin inspecţii, teste de

diagnosticare (ceas înregistrator al timpului de funcţionare al motoarelor) sau monitorizare (relee de timp).

Unii autori utilizează aceşti parametri uneori cu extindere la curentul motorului şi la curentul prin electromagneţii de închidere şi deschidere.

Se consideră, în urma analizei datelor statistice, că pompele, compresoarele, etc. vor trebui să se bucure, în viitor, de mai multă atenţie din partea tehnicilor de diagnosticare din acest domeniu.

Alţi parametri. In unele lucrări se descriu tehnici noi de diagnosticare cum ar fi sisteme de înregistrare şi evaluare a vibraţiilor acustice în structura întrerupătorului la acţionare normală, [27], sau la acţionare cu viteză redusă. Folosirea lor este deocamdată limitată, atâta timp cât aceste tehnici nu fac referiri concrete în ce priveşte prevenirea defectelor la întrerupător.

6.4.5. Circuitele electrice de control şi auxiliare

Sistemul de control electric. Sistemul de control electric constă din, [9], [35]:

- bobina de închidere şi una sau două bobine de deschidere;
- contactoare auxiliare pentru stabilirea curentului prin bobine;
- relee de blocare, cu rol de a preveni acţionările repetate (releu de antipompaj);
- contactoare auxiliare şi relee de timp;
- conductoare între toate aceste elemente.

Cei mai mulţi utilizatori supraveghează o serie despozitive ale sistemului de control electric, ca de exemplu: bobinele de închidere/deschidere, circuitele auxiliare de alimentare, blocajele. Totuşi funcţiile de monitorizare sunt adesea îndeplinite de echipamentul de protecţie (supravegherea bobinelor şi înfăşurărilor), sau de sistemele de control (supravegherea contactelor auxiliare şi a alimentării circuitelor auxiliare).

Viitorul sistemelor de control va fi cu microprocesor. Plecând de la acest punct de vedere, o dezvoltare completă nu este încă stabilită. Alegerea unor circuite simplificate de control este posibilă reconsiderând cu grijă funcţiile de îndeplinit.

Sistemul auxiliar electric. Sistemul auxiliar electric cuprinde din, [9], [35]:

- contacte auxiliare pentru informaţii de stare;
- circuite de alarmare pentru: blocaje, polul de discrepanţă, monitorul de densitate, semnalele de la mecanismul de acţionare;
- alte circuite de alarmare (încălzire, etc.);
- vizualizarea alarmei la punctul de control;
- circuite de alarmare la distanţă;
- monitor de densitate (presostat);
- încălzitoare;
- termostate;
- siguranţe fuzibile;
- conductoarele dintre aceste elemente.

In general sunt utilizate tehnici de monitorizare care folosesc stările microînt. rupătorului şi semnalele pasagere provenite de la comutatorul de presiune al mecanismului de acţionare, sau de la comutatorul de presiune compensat cu temperatura al monitorului de densitate sau de la releul de timp (releul termic) care supraveghează timpul de funcţionare al motorului.

In literatură este prezentată monitorizarea cu microprocesor care utilizează multe informaţii pentru a determina cele mai importante stări, pentru a evalua rezultatele, pentru a compara rezultatele obţinute cu cele statistice (istorice) şi a transmite alarme atunci când este necesar.

Noile tehnici de monitorizare sunt concentrate în direcţia determinării evoluţiei semnalelor măsurate pentru aprecierea momentului trecerii peste nivelurile impuse (de prag). Uneori monitorizarea este îndreptată spre determinarea comportării dinamice a semnalelor în comparaţie cu valorile lor statice. Cele mai perfecţionate dispozitive de monitorizare folosesc tehnici matematice complicate în vederea extragerii informaţiilor utile (eliminând

semnalele de eroare), folosite în calcule şi în compararea rezultatelor cu datele statistice.

Cele mai multe defecte datorate circuitelor electrice de control şi auxiliare pot fi preîntâmpinate dând mai multă atenţie circuitelor care supraveghează funcţiile vitale ale întrerupătorului. Utilizarea monitorizării cu ajutorul microprocesorului oferă multe posibilităţi de a colecta, de a prezenta, stoca şi transmite informaţii incluzând chiar informaţii despre monitorul însuşi. O altă posibilitate de a creşte performanţele monitorizării cu microprocesor este dată de sistemul hard, de tehnicile senzoriale complicate şi de programele soft, care pot asigura o fiabilitate foarte mare împreună cu aparate care furnizează informaţii cu privire la condiţiile de funcţionare şi de mediu.

Pentru moment cei mai mulţi utilizatori sunt mulţumiţi să utilizeze dispozitive de monitorizare cât mai simple, care să permită obţinerea de valori statistice, care să afişeze valorile semnalelor pasagere (trecătoare) atunci când depăşesc nivelurile de prag şi care să folosească tehnici foarte bine cunoscute.

6.4.6. Pierderi în sistemul de gaz SF_6

Din analiza rezultatelor obţinute se observă că cele mai multe defecte (minore dar şi majore) sunt datorate pierderilor de gaz şi monitorului de densitate. Cel mai utilizat monitor de densitate este un comutator de presiune compensat cu temperatura, care este conectat la cei trei poli ai întrerupătorului.

Tehnicile cele mai recomandate în literatură, măsoară presiunea gazului SF_6 şi uneori temperatura gazului sau etanşeitatea utilizând senzori optici. Densitatea este calculată cu ajutorul microprocesorului, care poate aprecia şi evoluţia ei în timp, [18], [22].

In unele lucrări este atrasă atenţia şi asupra evoluţiei presiunii dinamice a gazului, şi de asemenea asupra neomogenităţii densităţii gazului în volumul total.

Deocamdată constructorii de aparataj nu au încurajat perfecţionarea tehnicilor de monitorizare a pierderilor de gaz. Probabil că odată cu simplificarea senzorilor care vor putea fi fixaţi pe conductele instalaţiilor capsulate se va ajunge la o variantă fezabilă din punct de vedere tehnic şi comercial.

6.5. Structura unui sistem de monitorizare şi diagnosticare

Funcţia unui sistem de monitorizare şi diagnosticare este de a controla funcţiile principale ale întrerupătorului şi de a compara valorile măsurate ale anumitor parametri cu valorile prestabilite, corespunzătoare unui întrerupător în stare bună de funcţionare, sau cu valorile anterioare ale aceluiaşi întrerupător. Această comparaţie poate fi făcută continuu sau după fiecare manevră în scopul de a detecta orice eventuală abatere a parametrilor care ar putea declanşa un incident care să conducă la defectarea întrerupătorului.

Sistemul de supraveghere şi diagnosticare cu ajutorul calculatorului pentru întrerupătoare de înaltă tensiune trifazate, Fig.6.7, este bazat pe un sistem expert alimentat cu informaţiile provenite de la încercările realizate de constructor şi cu cele de la întrerupătorul supravegheat, [5], [12], [22].

Acest sistem de supraveghere şi diagnosticare conţine traductoare speciale pentu mărimile considerate mai importante a fi cunoscute sub aspectul stării tehnice a întrerupătorului, diverse tipuri de convertoare, fibre optice, microprocesor (microcalculator) etc.

Sistemul de diagnosticare necesită traductoare specializate pentru urmărirea:

- cursei contactelor mobile ale întrerupătorului, (TD);
- presiunii în camerele de stingere şi la mecanismul de acţionare (TP);
- curentului prin întrerupător, (TC);
- temperaturii în zona de contact, (TT).

Semnalele primite de la traductoare sunt transformate în semnale optice cu ajutorul unor convertoare electro/optice, apoi sunt

transmise prin fibre optice către receptoarele optice (convertoare opto/electrice). Fibrele optice sunt utilizate pentru transferarea datelor şi pentru izolarea galvanică între emiţătorul şi receptorul optic.

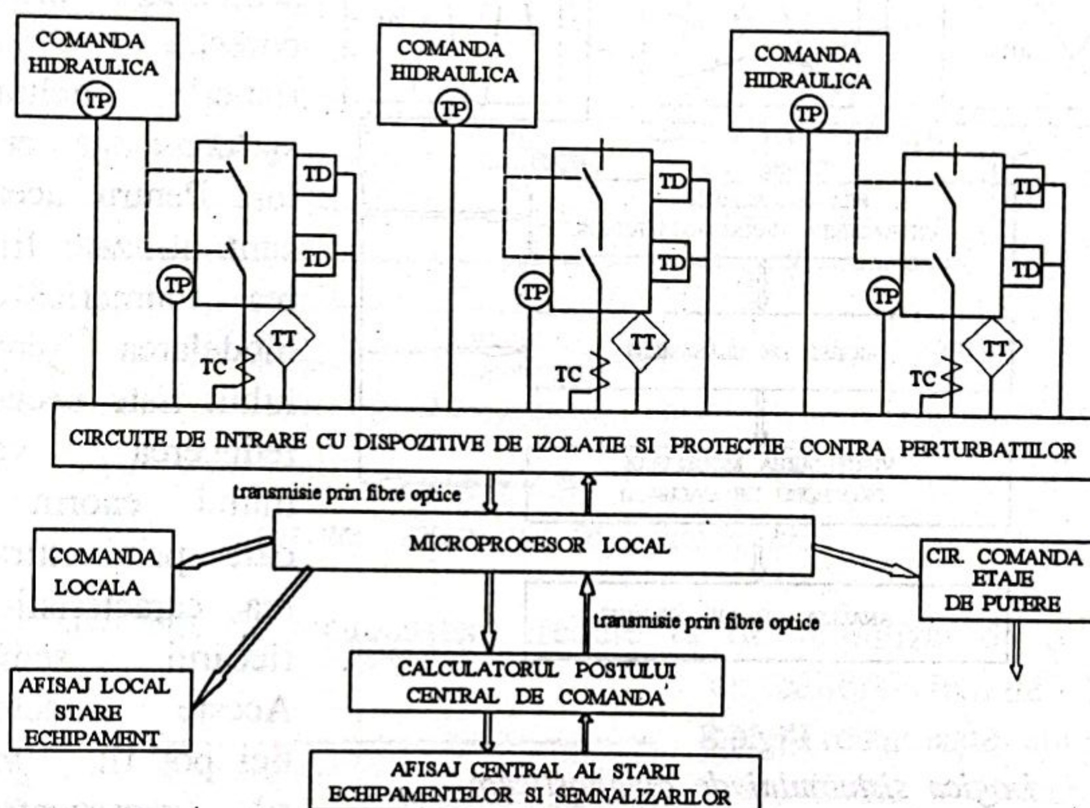


Fig.6.7

Structura unui sistem de monitorizare şi diagnosticare

De la convertoarele opto/electrice semnalele staţionare şi tranzitorii ale mărimilor supravegheate sunt preluate de către un microcalculator local. Microcalculatorul local poate fi integrat într-un sistem mai complex ce realizează urmărirea funcţionării în ansamblu a staţiei de transformare, lucru realizat cu un calculator central plasat în camera de comandă a staţiei.

Recunoaşterea stării tehnice complexe a unui întrerupător se realizează printr-o modelare matematică de recunoaştere şi clasificare a problemelor tipice (incidentelor, defectelor). Algoritmul unui sistem de diagnosticare prezintă următoarele subprograme, Fig.6.8:

- pretratarea şi filtrarea numerică a semnalelor;
- extragerea caracteristicilor şi reducerea datelor;

- modelul de clasament;
- verificarea modelului şi a procedeului de calibraj;
- analiza stării tehnice.

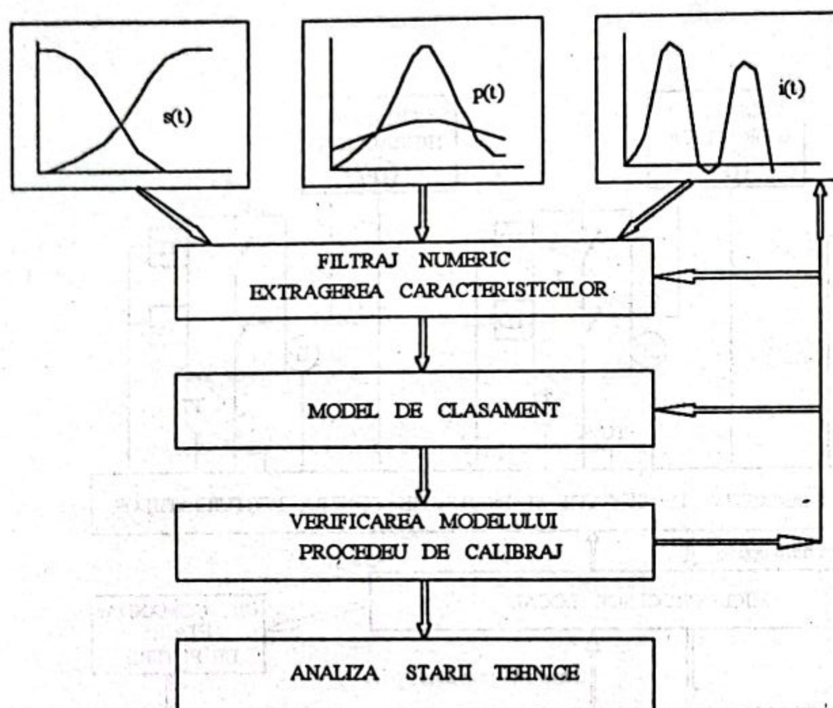


Fig.6.8
Logica sistemului de diagnosticare

Pretratarea semnalelor include corecţia caracteristicilor neliniare şi conversia erorilor. Pentru aceasta sunt utilizate filtrarea numerică şi modelarea semnalului. Este necesară reducerea volumului enorm de date prin extragerea caracteristicilor fiecărui semnal. Aceste caracteristici pot fi: valorile reprezentative ale semnalelor (minime, maxime, etc.); relaţiile dintre aceste valori; valorile derivatelor lor şi relaţiile dintre ele; funcţiile spectrale; parametrii de aproximare a funcţiilor.

După încercări, dacă sunt disponibile, mai multe semnale de la echipamentul supravegheat în condiţii normale şi extreme, atunci este posibil să realizăm un model de clasament. In acest model, problema recunoaşterii trebuie să fie redusă la câteva cazuri pentru toate tipurile de defecte. Pentru fiecare tip de defect posibil, programul va avea de găsit un răspuns la întrebarea: *"parametrii importanţi sunt sau nu într-un domeniu admisibil?"*.

Scopul sistemului de recunoaştere este de a identifica variaţiile parametrilor importanţi plecând de la semnalele măsurate. Acest lucru este realizat de sistem prin parcurgerea unui clasament specific diferitelor tipuri de perturbaţii şi defecţiuni, Fig.6.9.

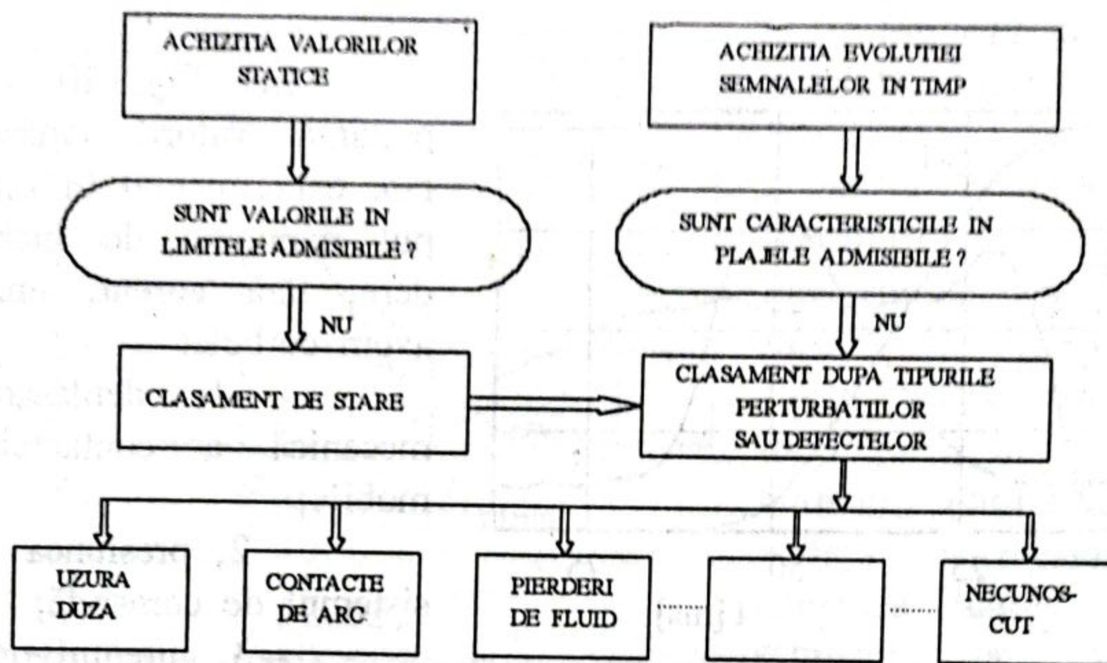


Fig.6.9

Structura sistemului de recunoaştere

Sistemul de recunoaştere trebuie să fie iniţializat de o fază de calibraj înainte de a putea recunoaşte automat respectivele perturbaţii sau defecţiuni. In această fază de calibraj este necesar să se verifice şi selecţioneze, cu ajutorul calculatorului, un număr mare de caracteristici prin diferite metode analitice.

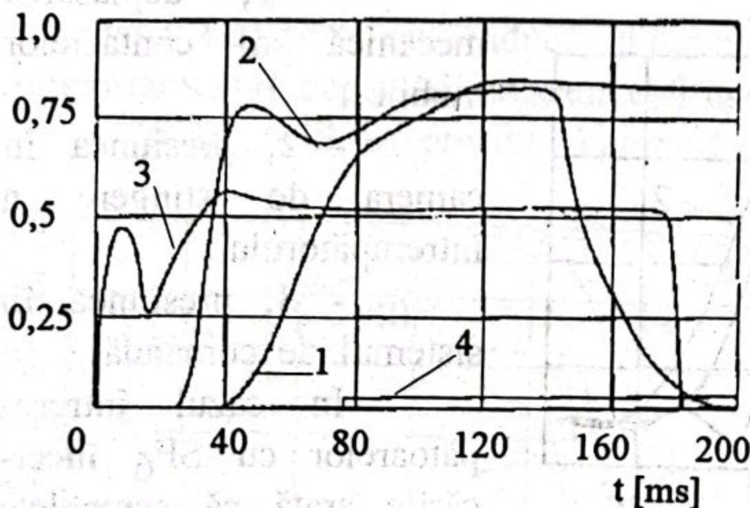


Fig.6.10

Evoluţia parametrilor pe durata manevrei de închidere a întrerupătorului

Aspectul curbelor de variaţie a parametrilor urmăriţi în timpul unei manevre de închidere şi de deschidere a unui întrerupător de 123 kV cu hexafluorură de sulf sunt date în Fig.6.10 şi Fig.6.11, [22].

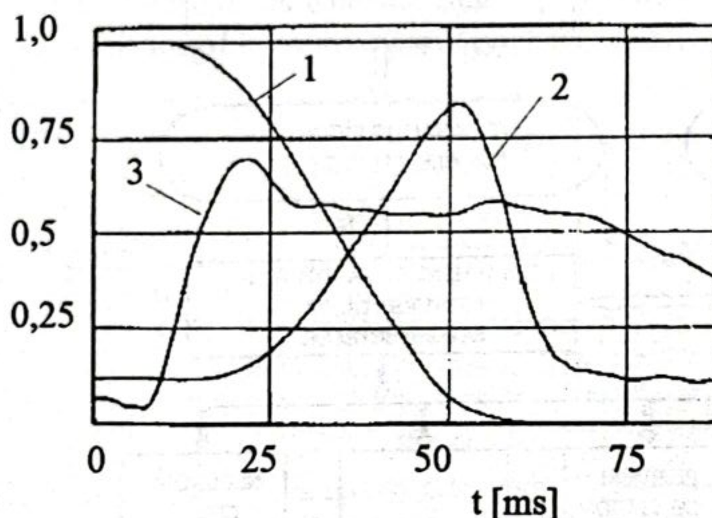


Fig.6.11

Evoluţia parametrilor pe durata deschiderii

In Fig.6.10 se prezintă valorile măsurate experimental în timpul manevrei de închidere, fără curent, unde avem curbele:

- 1, deplasarea mecanică a contactelor mobile;
- 2, presiunea în sistemul de comandă;
- 3, curentul prin bobina de anclanşare;
- 4, curentul prin contactele auxiliare.

Fig.6.11 prezintă valorile măsurate experimental în timpul manevrei de deschidere, fără curent, unde avem:

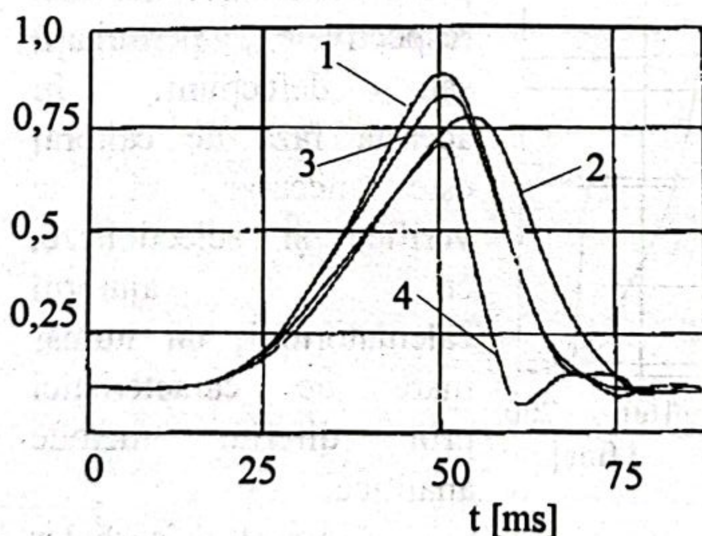


Fig.6.12

Variaţia presiunii pe durata manevrei de deschidere a întrerupătorului în diverse condiţii de lucru

- 1, deplasarea mecanică a contactelor mobile;
- 2, presiunea în camera de stingere a întrerupătorului;
- 3, presiunea în sistemul de comandă.

In cazul întrerupătoarelor cu SF_6 încercările arată că semnalele cele mai importante pentru aprecierea stării tehnice a întrerupătorului sunt variaţia presiunii în camera de stingere şi caracteristica mecanică deplasare-timp.

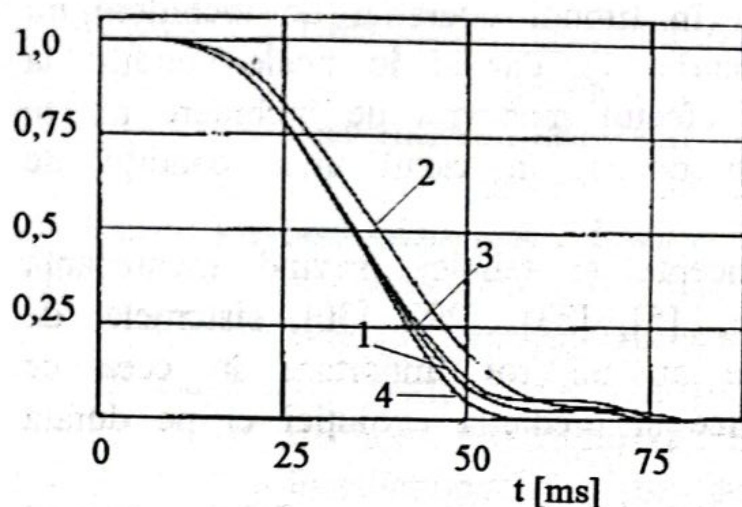


Fig.6.13
Deplasarea mecanică pe durata manevrei de deschidere în diverse condiții

Fig.6.12 și Fig.6.13 prezintă variația presiunii în camera de stingere, respectiv deplasarea mecanică în timpul unei manevre de deschidere în funcție de timp, unde avem curbele rezultate la încercări în condiții normale (curba 1), de variație a presiunii de comandă (curba 2), de scurgere la comandă (curba 3), de eroziune a duzei de suflaj (curba 4).
Din Fig.6.12 rezultă că în condițiile existenței variației presiunii la comandă, a scurgerii la comandă și a eroziunii duzei de suflaj se produc efecte remarcabile asupra caracteristicii de presiune din camera de stingere.
Aceleași variații, nu aduc diferențe atât de distincte în comportamentul deplasării mecanice, Fig.6.13.

In Fig.6.14 se prezintă comportamentul presiunii în sistemul de comandă și al deplasării mecanice în timpul unei manevre de închidere în funcție de timp. Rezultatele sunt înregistrate în condiții normale (curba 1), în condiții la limită (curba 2) și în condiții de defect (curba 3).

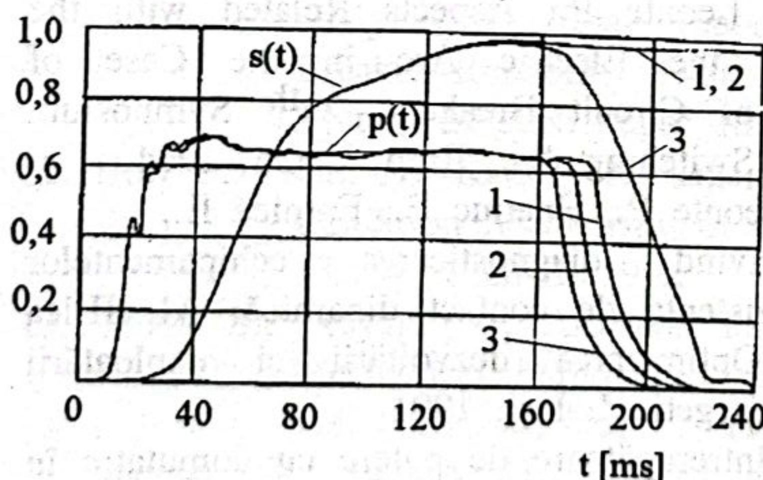


Fig.6.14
Comportamentul presiunii și al deplasării mecanice pe durata închiderii

Dacă o defecțiune este pe cale de a se dezvolta în sistemul de comandă pneumatic,

comanda se desfăşoară corect în timpul operaţiei de închidere nu numai în condiţii normale (curba 1), dar şi în unele condiţii la limită (curba 2). In schimb, efectul manevrei de închidere nu se mai produce, apare deci un defect, în cazul unor condiţii de defectare (curba 3).

In cadrul noilor concepte şi tehnici privind mentenanţa echipamentelor de comutaţie, [5], [23], [29], [30], sistemele de supraveghere şi diagnosticare au un rol important în ceea ce priveşte, stabilirea stării tehnice şi predicţia evoluţiei ei pe durata de viaţă rămasă.

Aceste sisteme devin din ce în ce mai fiabile datorită tehnicilor moderne de achiziţie (traductoare, fibre optice, convertoare opto/electrice şi electro/optice, cartele de achiziţii de date, etc.) şi prelucrare a datelor cu ajutorul calculatorului. Ele reprezintă un mijloc sigur de ameliorare a fiabilităţii întrerupătoarelor electrice şi de reducere a costului mentenanţei, prin determinarea intervalelor de mentenanţă pe baza stării tehnice previzibile a întrerupătorului şi nu la intervale fixe.

Bibliografie

1. Adam M., Baraboi A., Leonte P., Aspects Related with the Diagnosis of the Electric Arc in the Case of Maintenance of Circuit Breakers, XIth Symposium on Phsics of Switching Arc, Brno, Cehia, 1994
2. Adam M., Baraboi A., Leonte P., Hnatiuc E., Furnică E., Aspecte privind diagnosticarea echipamentelor electrice. Rezistenţa de contact dinamică, Al III-lea simpozion "Optimizarea dezvoltării şi exploatării instalaţiilor energetice", Iaşi, 1991
3. Baraboi A., Adam M., Intrerupătoare de putere cu comutaţie în hexafluorură de sulf, Energetica, Nr. 5-B, 1992
4. Baraboi A., Adam M., Furnică E., Echipamente electrice, Indrumar de laborator. Uiversitatea Tehnică Iaşi 1990

5. Barkan P., Deni J. A., McCabe A. K., Reckleff J. G., Scherer H. N., Woodward R. C., Méthodologie pour la surveillance de l'état des disjoncteurs des haute tension, Rapport 13.04, CIGRE, 1988
6. Baron T., Isaic-Maniu A., Tovissi L., Niculescu, D., Baron C., Antonescu V., Roman I., Calitate şi fiabilitate. Editura Tehnică, Bucureşti, 1988
7. Boudard A., Bernard G., Seyrling G., Alimentation de la traction électrique à la SNCF: surveillance des installations fixes par gammagraphie, Revue Générale de l'électricité, No. 6, 1993
8. Ciobanu S. S., Hong D., Fleurier C., Etude par spectroscopie d'émission et d'absortion et par imagerie d'un plasma d'arc tournant produit dans un disjoncteur, FIRELEC, Grenoble, 1994
9. Conecini I., Răşanu S., Tomescu I., Ionescu A., Cartea electricianului din staţii şi posturi de transformare, Editura Tehnică, Bucureşti, 1986
10. Haung R., Hahn R., Benabdelhamid F., Electromagnetic planimeter for electrical circuits, Meas. Sci. Technol. 1, London, 1990
11. Heising C. R., Colombo E., Janssen A. L. J.,. Maaskola J. E, Dialynas E., Final Report on High Voltage Circuit Breaker Reliability Data for Use in Substation and System Studies, Paper 13.201, CIGRE, 1994
12. Hoff P., Holm A., Karlen O., Lager U., Akesson U., Condition Monitoring of SF_6 Circuit Breakers, Paper 13.104, CIGRE, 1992
13. Ikeda S., Aoyagi A., Amenya T., Diagnostic Technique for Mechanical Failures of Gas Circuit Breakers, IEEE vol. PAS-100, No. 12, 1981
14. Jaenjean R., Landry M., Chénier A., Demissy D., Controleur électronique de commande et de surveillance de l'intégrité mécanique et électronique de disjoncteurs à haute tension, Rapport 13.11, CIGRE, 1988

15. Janssen A. L. J., Degen W., Tudrej M., Ikeda S., Application of Diagnostic Techniques for High voltage Circuit Breakers, Paper 13.101, CIGRE, 1992
16. Janssen A. L. J., Degen W., Tudrej M., Ikeda S., Diagnostic Techniques for HV Circuit Breakers and Its Application, CIGRE Symposium Berlin, 120.07, 1993
17. Janssen A. L. J., Degen W., Heising C. R., Bruvik H., Colombo E., Lanz W., Fletcher P., Sanchis G., A Summary of the Final Results and Conclusions of the Second International Enquiry on the Reliability of High Voltage Circuit Breakers, Paper 13.202, CIGRE, 1994
18. Jones G. R., Ali S., Irwin T., Parr D., Circuit Breakers Monitoring using Optical Fibre Based Systems, Paper 13.09, CIGRE, 1988
19. Lundgaard L. E., Tangen G., Skyberg B., Fagstad, Acoustic Diagnoses of GIS; Field Experience and Development of Expert System, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, 1992
20. Molony T., A Twenty-fife-year Review of Experience with SF_6 Gas Insulated Substations (GIS), Paper 23.101, CIGRE, 1992
21. Nakajima F., Kawagoe E., Horikoshi M., Sasaki K., Methods and future Trend to Improve Reliability of Circuit Breakers, Paper 13.107, CIGRE, 1992
22. Noack F., Gartner J., Heider T., Schwarz J., systéme de diagnostic à l'aide de calculateur des disjoncteurs à haute tension, Rapport 13.10, CIGRE 1988
23. Onu V., Noi concepte şi tehnici în mentenanţa echipamentelor electrice de comutaţie din instalaţiile energetice. In lucrările simpozionului "Tehnici noi în conducerea reţelelor de distribuţie", Iaşi, 1992
24. Peicov A., Tuşaliu P., Aparate electrice. Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1988

25. Runde M., Aurud T., Ottesen G., Skyberg B., Non-Invasive Condition Evaluation of Circuit Breakers, Peper 13.106, CIGRE, 1992
26. Ryan H., Jones G., SF_6 Switchear. Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1989
27. Stokes A. D., Timbs L., Diagnostics de disjoncteurs, Rapport 3.03, CIGRE, 1988
28. Vigreux J., Application des techniques de surveillance d'état aux postes blindés, Electra, Nr. 134, 1991
29. Villemeur A., Sûreté de fonctionnement des systemes industriels, Collection de la direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Paris, Eyrolles, 1988.
30. Zwingelstein G., Diagnostic de pannes: pratique du diagnostic industriel, Séminaire Hermès, Paris, 1989
31. * * * , PE 013/94, Normativ privind metodele şi elementele de calcul al siguranţei în funcţionare a instalaţiilor energetice, ICEMENERG, Bucureşti, 1995
32. * * * , Carte tehnică H14P40 H17P40, Electroputere Craiova, 1988
33. * * * , PE 116/84, Normativ de încercări şi măsurători la echipamente şi instalaţii electrice, ICEMENERG, Bucureşti, 1985
34. * * * , L'arc électrique et ses applications. Editions du CNRS, Paris, 1984
35. * * * , SF_6 Circuit Breakers, Type LTB, ABB HV Switchgear, 1990

Capitolul 7

TEHNICI MODERNE IN COMUTATIA DE PUTERE LA JOASA TENSIUNE

7.1. Principii moderne de realizare a comutaţiei la joasă tensiune

Tehnicile clasice de comutaţie se bazează pe deplasarea unor piese mobile de contact între care se manifestă, "ca un rău necesar", arcul electric de întrerupere, ce trebuie stins pentru a valida deconectarea circuitului respectiv. In aceste condiţii evoluţia a însemnat, pe de o parte, perfecţionarea continuă a construcţiei camerelor de stingere şi a contactelor, atât ca formă geometrică cât şi ca material şi, pe de altă parte, alegerea convenabilă a mediului de stingere a arcului electric, într-o bună concordanţă cu parametrii cinematici ce caracterizează mişcarea contactelor mobile.

Cerinţele impuse în funcţionarea incintelor specializate din componenţa aparatelor electrice de comutaţie, în care are loc arderea şi stingerea arcului electric şi deci întreruperea propriuzisă a circuitului, numite camere de stingere, ce anunţă preocupările majore în cercetarea din acest domeniu, sunt:

-durată minimă de ardere a arcului electric;

-energie minimă disipată de coloana de arc în camera de stingere;

-consum minim de materiale active la o întrerupere reuşită;

-efecte secundare de întrerupere (acustice, luminoase) cât mai reduse;

-preţ de cost şi cheltuieli de exploatare cât mai mici.

In ultimul timp, după identificarea acţiunii distrugătoare a arcului electric asupra elementelor componente ale camerelor de stingere şi a contactelor, datorată în principal temperaturilor ridicate proprii plasmei, problema comutaţiei a fost abordată şi dual, urmărindu-se realizarea deconectarii circuitelor fără amorsarea arcului electric. Soluţiile la care s-a ajuns contureazǎ două direcţii principale ale acestor preocupări şi anume:

-asigurarea comutaţiei fără arc electric pentru aparate electrice tradiţionale cu contacte, prin completarea acestora cu accesorii convenabile, ajungându-se final la construcţii ce realizează comutaţia sincronizată respectiv comutaţia hibridă;

-asigurarea comutaţiei statice, fără contacte, prin modificarea comandată a unei impedanţe (rezistenţe) între o valoare maximă, corespunzătoare circuitului deschis şi o valoare minimă, corespunzătoare circuitului închis. Remarcăm că realizările ce reflectă comutaţia statică a circuitelor apelează obişnuit fie la modificarea rezistenţei unor joncţiuni semiconductoare fie la modificarea reactanţei inductive a unor bobine comandate.

De subliniat faptul că în măsura în care progresele tehnologice vor permite comanda modificării în limite largi a reactanţei capacitive, vom regăsi desigur şi aplicaţii ale acestora în realizarea comutaţiei statice.

7.1.1. Principiul comutaţiei sincronizate

Comutaţia sincronizată se referă la circuitele de curent alternativ şi propune deschiderea contactelor mobile ale unui aparat clasic de comutaţie anume în momentul trecerii naturale prin zero a curentului (Fig.7.1). Datorită valorii nule a curentului, arcul electric nu se mai amorsează iar energia disipată de coloană, în procesul de deconectare a circuitului W_a, dată de relaţia:

$$W_a = \int_0^{t_a} u_a i_a \, dt, \tag{7.1}$$

devine practic nulă, $u_a(t)$ şi $i_a(t)$ reprezentând tensiunea şi respectiv curentul de arc, ceea ce se constituie principalul avantaj al acestei soluţii tehnice. Ca o consecinţă firească intervine diminuarea uzurii camerei de stingere şi a contactelor electrice la exploatarea unor asemenea aparate, ce are ca efect creşterea duratei de viaţă de exemplu de circa 100...1000 de ori.

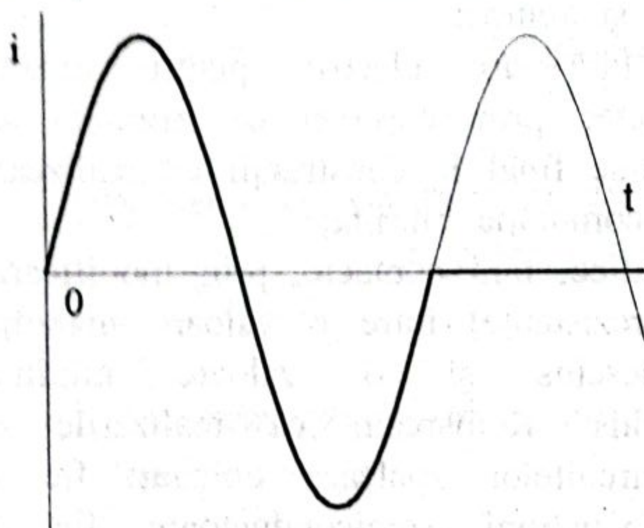


Fig.7.1
Principiul deconnectării sincronizate

Schema de principiu a unui aparat electric cu comutaţie sincronizată este dată în Fig.7.2 şi cuprinde aparatul electric clasic cu contacte AE, cu dispozitivul său de acţionare DA, la care se adaugă un ansamblu de sincronizare, AS. Ansamblul de sincronizare sesizează trecerile naturale prin zero ale curentului ce parcurge circuitul şi furnizează un impuls de comandă a deconectării. Condiţia esenţială pentru realizarea practică a deconectării sincronizate a circuitului respectiv este ca suma timpilor proprii de întârziere corespunzători ansamblului de sincronizare, t_{AS} şi respectiv dispozitivului de acţionare t_{DA} , să reprezinte un multiplu întreg de semiperioade în raport cu frecvenţa tensiunii sursei de alimentare:

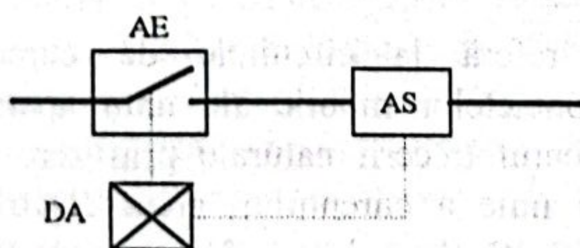


Fig.7.2
Schema de principiu a unui aparat cu comutaţie sincronizată

$$t_{DA} + t_{AS} = k\frac{T}{2}, \quad (7.2)$$

unde T este perioada iar k-număr natural, de dorit cât mai mic (eventual egal cu unitatea pentru întreruperi sincronizate la prima trecere prin zero a curentului din circuit).

Pentru a putea satisface condiţia (7.2) este necesar pe de o parte ca valorile t_{DA} să aibă o împrăştiere cât mai mică, ceea ce

presupune utilizarea unor aparate electrice cu dispozitive de acţionare performante, dar şi realizarea, pe de altă parte, a unei ajustări a valorilor timpului t_{AS} de până la o semiperioadă (0,01s). Buna funcţionare a unor asemenea aparate cu comutaţie sincronizată presupune desigur viteze mari de separare a contactelor acestora dar şi treceri naturale prin zero ale curentului ce se succed la intervale de timp egale cu o semiperioadă, deci regim permanent sinusoidal pentru circuitele respective şi nu regimuri tranzitorii de conectare sau de defect, pe durata cărora trecerile succesive prin zero ale curentului nu se mai realizează după exact o semiperioadă.

Trebuie subliniat faptul că deşi teoretic deconectarea sincronizată s-ar putea realiza şi în raport cu trecerile naturale prin zero ale tensiunii, realizările practice, menţionate în literatură [3], [7], se referă doar la soluţii ce asigură sincronizarea după valorile curentului. In plus, necesitatea identificării momentelor de trecere naturală prin zero ale curentului impune utilizarea a trei module monofazate identice, independente în cazul comutaţiei sincronizate a circuitelor trifazate.

Este important să semnalăm de asemenea comutaţia sincronă, cu faza de conectare controlată riguros, utilizată în staţiile de încercări de mare putere, care permite obţinerea curenţilor intenşi echivalenţi curenţilor de scurtcircuit din exploatare.

7.1.2. Principiul comutaţiei hibride

Comutaţia hibridă este tot o reflectare a preocupărilor de a realiza comutaţia fără arc electric a circuitelor de curent alternativ, care constă în şuntarea contactelor principale ale aparatului electric AE, (Fig.7.3) cu ajutorul a două tiristoare antiparalel convenabil comandate.

Practic se urmăreşte ca la deconectarea circuitului, în momentul deschiderii contactului K al aparatului electric, conducţia să fie preluată de unul dintre cele două tiristoare, în concordanţă cu polaritatea momentană a tensiunii sursei de alimentare. Deoarece tensiunea anod-catod pentru un semiconductor în conducţie este de ordinul voltului, insuficientă deci pentru amorsarea arcului electric,

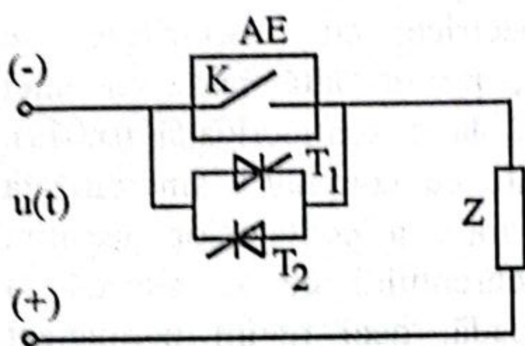


Fig.7.3
Schema de principiu pentru comutaţia hibridă în c. a.

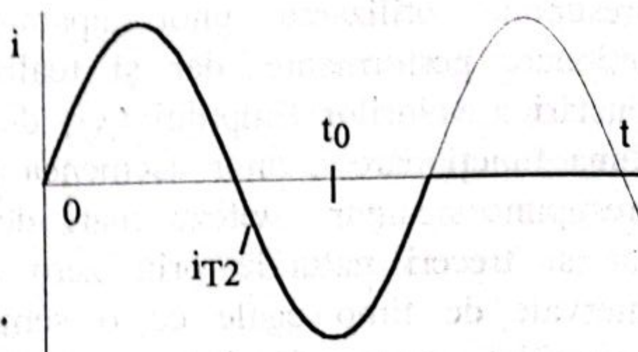


Fig.7.4
Principiul comutaţiei hibride

se poate obţine deconectarea fără arc electric a consumatorului indicat prin impedanţa Z_S. Evoluţia în timp a curentului la deconectarea hibridă a unui circuit cu ajutorul unui aparat de comutaţie având structura celui prezentat în Fig.7.3 este indicată în Fig.7.4 şi evidenţiază, corespunzător momentului t_0 de deschidere a contactului principal al aparatului K, preluarea conducţiei prin tiristorul T_2, după care intervine deconectarea propriuzisă a consumatorului, reprezentat prin impedanţa Z_S.

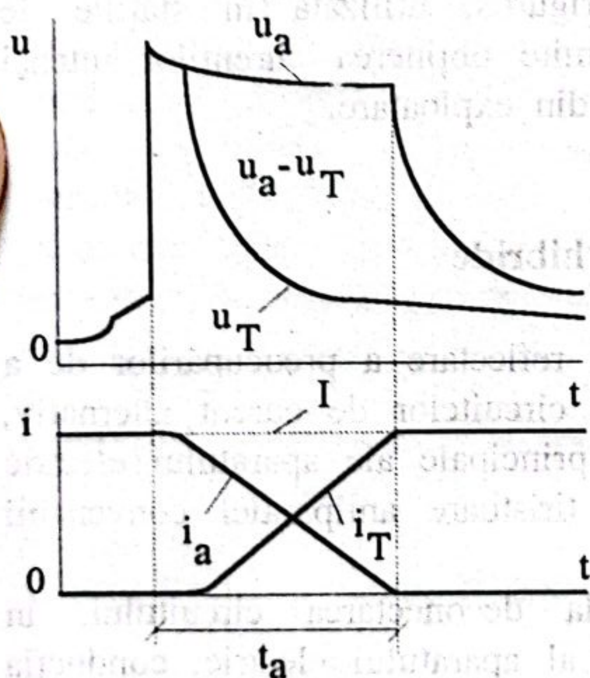


Fig.7.5
Comutaţia dinamică şi hibridă

Principalul avantaj al comutaţiei hibride este acela că se poate adapta pentru aparate electrice de construcţie obişnuită, neimpunându-se de exemplu restricţii cu privire la împrăştierea valorilor timpului de deschidere a contactelor, ca în cazul comutaţiei sincronizate. In plus semiconductoarele comandate de tip tiristor sau triac preiau conducţia la deconectare pentru o durată de cel mult o semiperioadă, fiind posibilă utilizarea lor judicioasă şi chiar renunţarea la radiatoarele aferente. Se cumulează deci avantajele certe ale contactelor electrice la funcţionarea normală, de durată, cu avantajele oferite de elementele

semiconductoare comandate în regimul tranzitoriu de deconectare. Aprecierea avantajelor comutaţiei hibride se poate realiza mai deplin examinând curbele prezentate în Fig.7.5, ce sugerează comutaţia cu arc electric şi fără arc electric (hibridă) într-un circuit ce funcţionează la curent constant. Intre curbele care descriu evoluţia în timp a tensiunii la bornele arcului electric de comutaţie u_a, respectiv evoluţia în timp a tensiunii la bornele tiristorului de şuntare u_T, se evidenţiază suprafaţa (u_a-u_T), ce anunţă diminuarea considerabilă a energiei disipate în camera de stingere în procesul de comutaţie, care în curent alternativ devine de doar (6...15)% din energia arcului electric [7], [10].

Preocupările legate de realizarea unor echipamente cu comutaţie hibridă evidenţiază următoarele chestiuni importante:

-separarea galvanică a consumatorului în situaţia deconectat, ce apelează eventual la un pol separator exterior pentru fiecare modul monofazat;

-definirea unor criterii pentru realizarea cât mai eficientă a comenzii semiconductoarelor de preluare a conducţiei, de tip tiristor sau triac;

-protecţia semiconductoarelor de şuntare împotriva supratensiunilor de comutaţie şi a efectelor curenţilor de defect;

-opţiunea pentru asigurarea comutaţiei hibride doar la deconectare sau pentru ambele manevre ce pot interveni în circuitul respectiv (conectare-deconectare), prima variantă fiind adesea preferată.

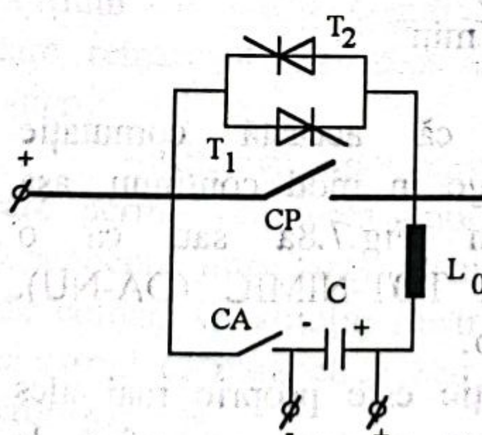


Fig.7.6

Principiul comutaţiei hibride în curent continuu

Trebuie menţionat faptul că avantajele certe ale comutaţiei hibride au impus acceptarea acesteia şi pentru deconectarea circuitelor de curent continuu. Pentru asemenea aplicaţii, prin descărcarea oscilantă a unui condensator încărcat, se asigură modularea curentului rezultant ce parcurge contactele principale ale aparatului, cu câteva anulări ale acestuia, după care funcţionarea decurge conform cu cele prezentate anterior cu privire la comutaţia

hibridă de curent alternativ. Schema de principiu ce ilustrează posibila utilizare a comutației hibride pentru circuitele de curent continuu este dată în Fig.7.6; prin corelare mecanică se asigură închiderea contactului auxiliar CA, asociată cu deschiderea contactului principal CP, ceea ce permite descărcarea oscilantă a condensatorului C_0 și ulterior preluarea conducției prin tiristoarele T_1 sau T_2.

7.1.3. Principiul comutației statice

Comutația statică, numită adesea și comutație fără contacte, propune modificarea între limite, de dorit cât mai largi, a valorilor curentului din circuit, asociind valoarea minimă a acestuia cu situația de circuit deconectat, respectiv valoarea sa maximă cu situația de circuit conectat. Acest deziderat se realizează cu ajutorul unei impedanțe comandate Z^*, ce asigură modificarea valorilor curentului ce parcurge consumatorul indicat prin impedanța Z_s (Fig.7.7). In legătură cu aceasta se poate defini gradul de comutație γ, ca raport între valorile maximă și minimă ale impedanței Z^*:

$$\gamma = \frac{Z^*_{max}}{Z^*_{min}}. \qquad (7.3)$$

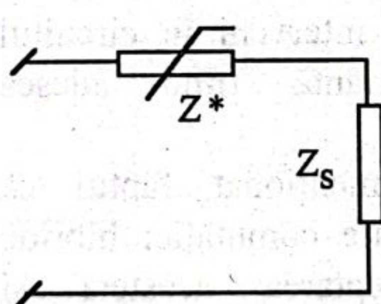


Fig.7.7
Principiul comutației statice

Subliniem faptul că această comutație statică poate decurge în mod continuu, așa cum se vede în Fig.7.8a sau ca o comutație de tipul TOT-NIMIC (DA-NU), ilustrată în Fig.7.8b.

Prima situație este proprie mai ales unor bucle de reglaj automat, în timp ce a doua se referă la comutația propriuzisă a circuitelor.

Trebuie remarcat că pentru a realiza comutația statică de tipul TOT - NIMIC este necesar ca impedanta Z^* să prezinte

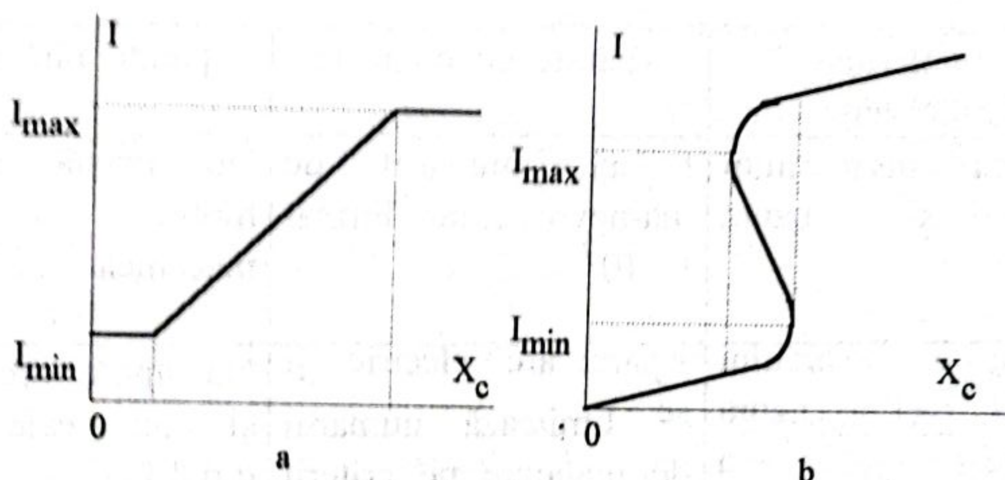


Fig.7.8

Tipuri de comutaţie statică: a-continuă; b-prin salt.

porţiuni cu pantă negativă în raport cu mărimea de comandă X_c, printr-o caracteristică voltamper în N sau S.

O altă soluţie pentru obţinerea comutaţiei statice de tip TOT-NIMIC o reprezintă amplificatoarele cu reacţie pozitivă suficient de intensă, a căror caracteristică intrare-ieşire dobândeşte în asemenea condiţii porţiuni cu pantă negativă.

Rezultă deci că pentru a realiza comutaţia statică a circuitelor se poate apela la una dintre soluţiile de mai jos:

-utilizarea unor elemente de circuit cu impedanţă comandabilă în raport cu un anumit parametru, care prezintă porţiuni cu pantă negativă ale caracteristicii lor voltamper, dintre care remarcăm mai ales elementele semiconductoare comandate de putere;

-utilizarea unor circuite în care au loc fenomene neliniare, care permit obţinerea unor discontinuităţi (cu evoluţii prin salt) în dependenţa impedanţei echivalente în raport cu o mărime de intrare (de comandă), soluţie ilustrată de amplificatoarele cu reacţie pozitivă (electronice, magnetice sau chiar hidraulice) ca şi de fenomenul de ferorezonanţă.

Pentru a contura încă mai clar domeniul comutaţiei statice (fără contacte) în Tab.7.1 se prezintă o sinteză a calităţilor, performanţelor reprezentative şi particularităţilor proprii aparatelor cu contacte, respectiv cu comutaţie statică.

Tab.7.1

Particularităţi Performanţe	Aparate cu contacte	Aparate fără contacte
Existenţa ansamblului mobil şi uzură acestuia	Există, numărul de ma-nevre fiind limitat la 10^7	Nu există ansamblu mobil şi uzură mecanică
Apariţia arcului electric şi uzura electrică a componentelor	Apare arc electric şi se limitează numărul de manevre pe criterii electrice la 10^6 manevre	Nu apare arc electric şi nu este limitat d.p.d.v. electric numărul de manevre
Timp de acţionare şi frecvenţă de conectare	Timpi de acţionare de $10^{-1}...10^{-2}$ s, frecvenţă de conectare de până la 10^3 cicluri/oră	Timp de acţionare de 1 ms, frecvenţa de conec- tare de $10^5...10^6$ cicluri/oră
Stabilitate la şocuri şi vibraţii	Afectează buna funcţionare a acestora	Nu influenţează func- ţionarea
Comportarea în medii periculoase	Pot fi utilizate doar când se adoptă măsuri speciale de protecţie	Funcţionare normală
Posibilitatea modificării lente a curentului din circuit cu trecere de la regimul de amplificator la regimul TOT-NIMIC	Nu	Da
Gradul de comutaţie şi separarea galvanica în starea deconectat	Grad de comutaţie 10^{14}, cu separare galvanică	Grad de comutaţie 10^7, necesită pol separator exterior
Pierderi de energie şi încălzirea elementelor de comutaţie	Mici, datorită căderii neglijabile de tensiune pe contacte (mV)	Mari, căderea de ten- siune pe contacte fiind de circa 1 V

Tab.7.1(continuare)

Comportarea la apariția unor curenți de defect	Sunt suportați de aparat	Necesită măsuri speciale de protecție
Cost	Poate fi încă scăzut	De câteva ori mai mare comparativ cu aparatele clasice
Fiabilitate	Ridicată, dar depinde de calitatea întreținerii	Foarte bună și nu depinde de întreținere
Dimensiunile aparatului	Construcții compacte	De câteva ori mai mari în comparație cu cele cu contacte
Efecte secundare ale comutației	Există, acustice și luminoase	Lipsesc

Opțiunea specialistului pentru una sau alta dintre soluțiile posibile pentru a realiza comutația statică a circuitelor va ține desigur seama atât de particularitățile de funcționare proprii fiecărei variante cât și de restricțiile corespunzătoare diferitelor tipuri de consumatori. Practic definirea unor indicatori sintetici care să permită compararea multiplelor soluții ce permit realizarea comutației statice a circuitelor și aprecierea oportunității opțiunii pentru o anumită rezolvare, reprezintă o preocupare deplin justificată a cercetătorilor în acest domeniu. Informatii parțiale cu privire la comutația statică a circuitelor oferă indicatori de tipul:

-factorul de multiplicare în curent K_I, evaluat ca raport între valorile maximă și minimă ale curentului din circuit:

$$K_I = \frac{I_{max}}{I_{min}}; \qquad (7.4)$$

-factorul de multiplicare a puterii K_P, obținut ca raport între valoarea maximă a puterii comandate în circuitul consumatorului, P_{smax} și puterea consumată in circuitul de comandă, P_{cmin}:

$$K_P = \frac{P_{s\max}}{P_{c\min}}. \tag{7.5}$$

La aceştia se pot adăuga indicatori tehnico-economici, care raportează de obicei performanţele sau costurile la unitatea de volum a ansamblului ca şi informaţii cu privire la timpul de acţionare, fără a permite totuşi compararea concludentă a unor variante constructive distincte.

7.1.4. Dispozitive electromagnetice în regim de comutaţie

Soluţiile cunoscute care realizează comutaţia statică cu ajutorul unor dispozitive electromagnetice apelează fie la amplificatoare magnetice cu reacţie pozitivă, fie la circuite ferorezonante.

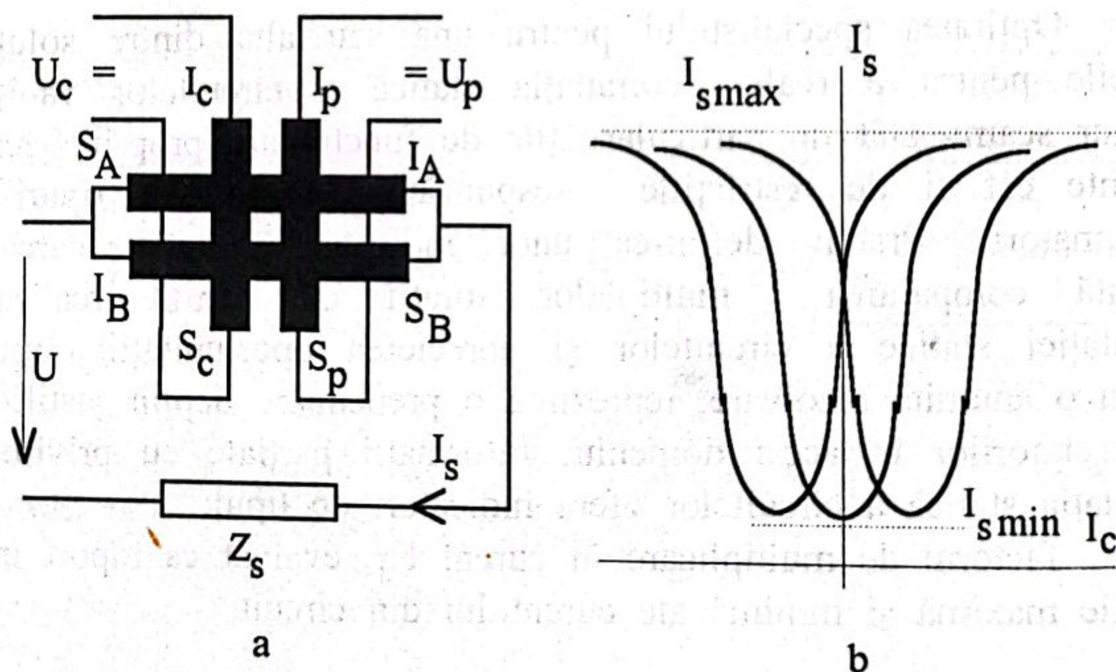


Fig.7.9

Amplificatorul magnetic: a-schema electrică de principiu; b-caracteristici.

Schema de principiu a amplificatorului magnetic este dată în Fig.7.9a şi evidenţiază înfăşurările de sarcină I_A-S_A respectiv I_B-S_B, înfăşurarea de comandă I_C-S_C şi înfăşurarea de polarizare I_P-S_P dispuse pe un acelaşi circuit magnetic. Caracteristica de transfer

a acestuia, în fond dependenţa valorilor curentului de sarcină I_s, în raport cu intensitatea curentului de comandă I_c, este prezentată în Fig.7.9b. Pentru o valoare nulă a curentului ce parcurge înfăşurarea de polarizare I_p, caracteristica $I_s(I_c)$ este simetrică faţă de axa ordonatelor; pentru valori nenule ale curentului de polarizare aceasta se translează în concordanţă cu orientarea solenaţiei înfăşurării de polarizare faţă de solenaţia înfăşurării de comandă.

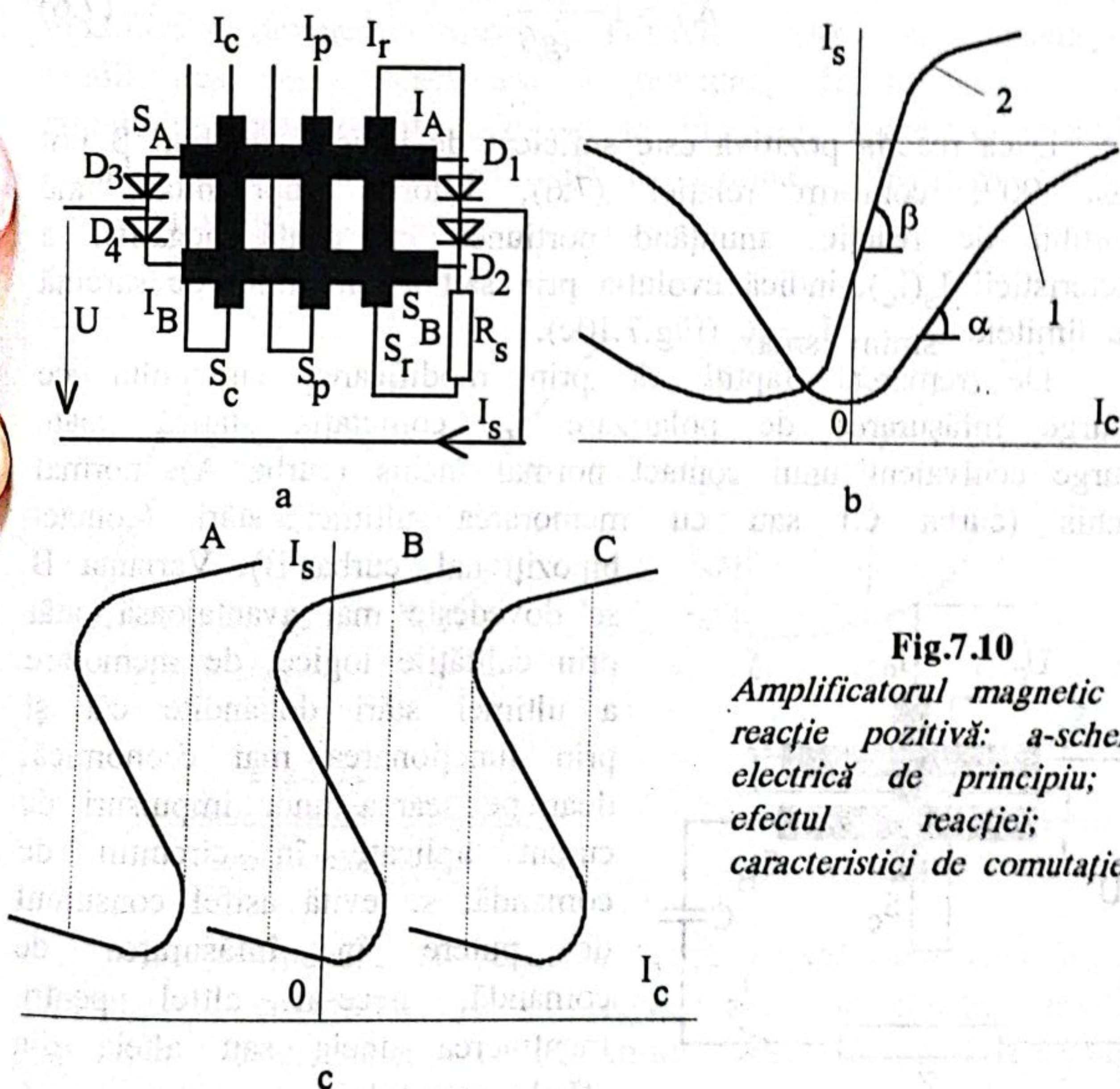


Fig.7.10
Amplificatorul magnetic cu reacţie pozitivă: a-schema electrică de principiu; b-efectul reacţiei; c-caracteristici de comutaţie.

Reacţia pozitivă în funcţionarea amplificatoarelor magnetice se poate obţine pe seama solenaţiei date de o înfăşurare suplimentară de reacţie externă I_r-S_r, pe seama solenaţiei date chiar de înfăşurările de sarcină prin utilizarea unor diode semiconductoare D_1-D_4, ce intervine ca o reacţie internă, sau ca reacţie mixtă, când

cele două procedee se cumulează (Fig.7.10a). Ca efect al reacției pozitive se obține o creștere a factorului de amplificare, deci a pantei caracteristicii de transfer, așa cum se observă în Fig.7.10b, unde curbele 1, 2 corespund funcționării fără reacție, respectiv cu reacție. Factorul de reacție K_r poate fi evaluat în aceste condiții cu ajutorul relației, [24]:

$$K_r = 1 - \frac{tg\alpha}{tg\beta}. \quad (7.6)$$

Dacă reacția pozitivă este suficient de intensă, unghiul β pot depăși 90^0; conform relației (7.6), valorile supraunitare ale factorului de reacție, anunțând porțiunea cu pantă negativă a caracteristicii $I_s(I_c)$, indică evoluția prin salt a curentului de sarcină între limitele I_{smin}, I_{smax} (Fig.7.10c).

De remarcat faptul că prin modificarea curentului ce parcurge înfășurarea de polarizare I_p, comutația statică poate decurge echivalent unui contact normal închis (curba A), normal deschis (curba C) sau cu memorarea ultimei stări (contact bipozițional, curba B). Varianta B se dovedește mai avantajoasă, atât prin calitățile logice, de memorare a ultimei stări dobândite cât și prin funcționarea mai economică, doar pe seama unor impulsuri de curent aplicate în circuitul de comandă; se evită astfel consumul de putere în înfășurarea de comandă, necesar altfel pentru menținerea uneia sau alteia din stările aparatului.

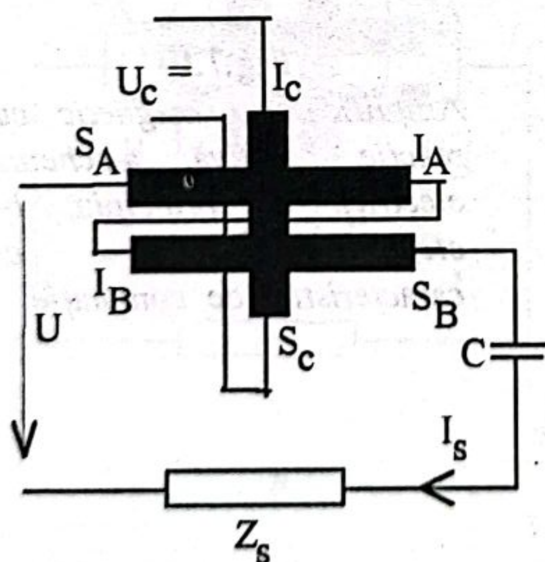


Fig.7.11

Dispozitiv electromagnetic de comutație cu ferorezonanță

Alegerea convenabilă a amplificatorului magnetic și a punctului de funcționare al acestuia, permite adaptarea unor asemenea scheme la diferiți parametri nominali ai circuitului în care se dorește utilizarea comutației statice. Schema de principiu care permite realizarea

comutației statice cu ajutorul unor dispozitive electromagnetice ce folosesc fenomenul de ferorezonanță este dată în Fig.7.11 și cuprinde inductanța realizată cu semibobinele I_A-S_A respectiv I_B-S_B, ce pot fi conectate în serie sau în paralel, la care se adaugă capacitatea C și desigur impedanța de sarcină Z_s, ce corespunde consumatorului. Caracteristica tensiune-curent a unui circuit ferorezonant serie ideal (conservativ), este dată în Fig.7.12, curba 1; în cazul circuitelor reale (cu pierderi), această caracteristică se modifică și devine de forma 2. Potrivit acestora, se constată că la modificarea lent crescătoare a tensiunii de alimentare U, a circuitului ferorezonant serie dat în Fig.7.11, apare fenomenul de creștere prin salt a curentului de sarcină, echivalent conectării consumatorului Z_s.

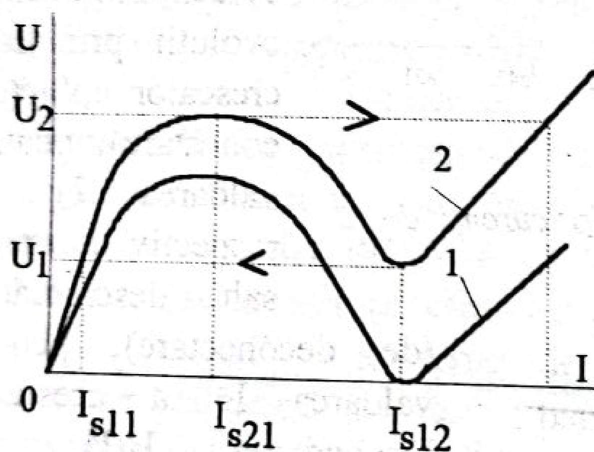


Fig.7.12
Caracteristicile circuitului ferorezonant serie

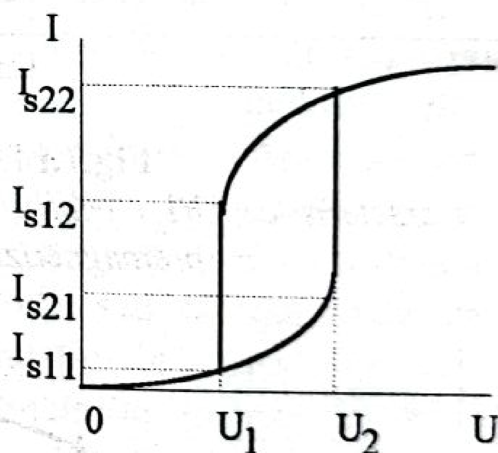


Fig.7.13
Comanda prin tensiunea de alimentare

De asemenea, la scăderea lentă a valorilor tensiunii de alimentare a circuitului, pentru valoarea U_1, se constată evoluția prin salt descrescător a curentului din circuit, echivalentă deconectării consumatorului Z_s. Comutația statică a unui asemenea dispozitiv electromagnetic cu ferorezonanță este comandată, în acest caz, prin valorile tensiunii de alimentare a circuitului U, dependența $I_s(U)$ fiind prezentată în Fig.7.13.

Se remarcă faptul că pentru un asemenea dispozitiv electromagnetic cu ferorezonanță, comutația statică poate fi comandată și prin modificarea curentului de premagnetizare I_c.

Pentru valori diferite ale curentului de premagnetizare, alura caracteristicii tensiune-curent a dispozitivului electromagnetic cu ferorezonanță se modifică așa cum se poate urmări în Fig.7.14.

Considerând o valoare constantă U^* a tensiunii de alimentare a circuitului dat în Fig.7.11, se constată că prin variația curentului de comandă se modifică practic curentul de sarcină I_s, evidențiindu-se evoluții prin salt crescător (de conectare), pentru valoarea I_4 și respectiv prin salt descrescător (de deconectare), pentru valoarea I_3 a acestuia. Dependența $I_s(I)$, ce ilustrează comutația statică a dispozitivului ferorezonant, comandată prin curentul de premagnetizare I, este dată în Fig.7.15 și se obține folosind elementele indicate în Fig.7.14. Comparând cele două procedee de comutație statică (Fig.7.11) prin indicatorii definiți cu relațiile (7.4) și (7.5), se poate afirma că se obțin

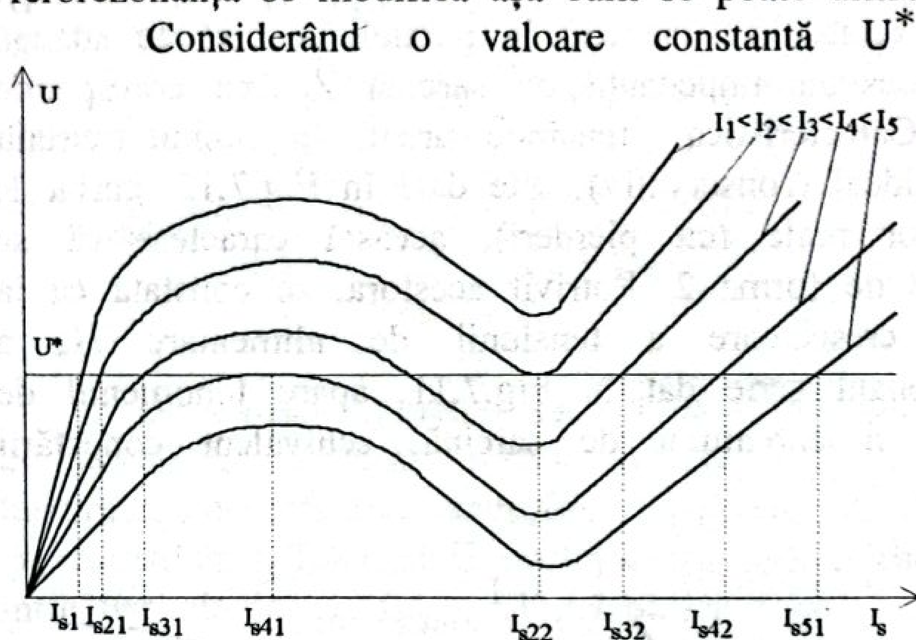


Fig.7.14

Caracteristica $U(I_s)$ pentru diferiți curenți de premagnetizare

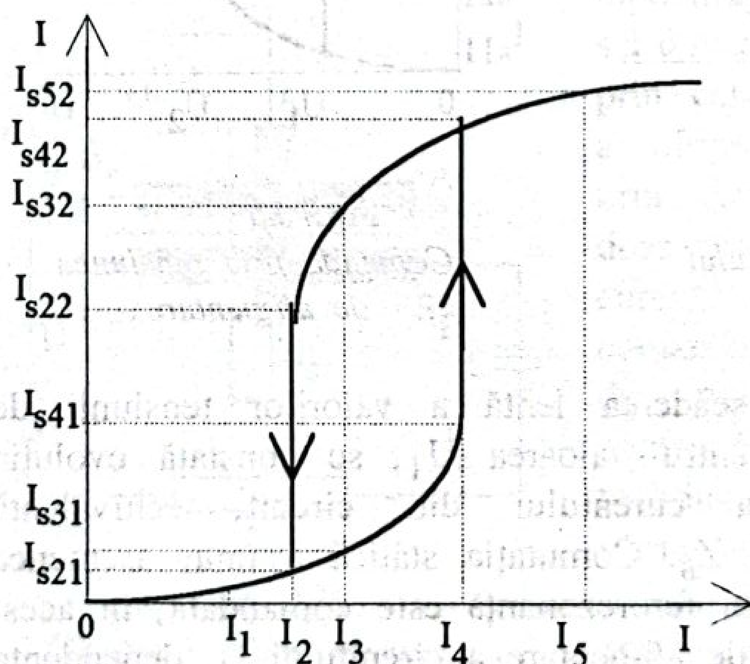


Fig.7.15

Comutația cu ajutorul curentului de premagnetizare

performanțe superioare atunci când se comandă comutația prin intermediul curentului de premagnetizare (Fig.7.15).

Trebuie menționat faptul că realizarea unor asemenea dispozitive electromagnetice cu comutație statică nu a făcut obiectul de interes al unor firme specializate în producerea de aparate de comutație ci a fost rezultatul activității specialiștilor care au impus astfel de ansambluri pentru anumite aplicații, remarcându-se mai ales robustețea lor și nu performanțele de regim dinamic.

7.2. Aparate de comutație de joasă tensiune

Instalațiile electrice de joasă tensiune se realizează, conform normelor, pentru tensiuni nominale de până la 1000 V în curent alternativ și respectiv 1200 V în curent continuu. Comutația tradițională în asemenea instalații, cu tensiunea nominală comparabilă cu tensiunea de arc, apelează de obicei la alungirea rapidă a coloanei de arc, asociată eventual cu accesorii specifice aparatelor electrice de joasă tensiune, cum ar fi de exemplu grilele metalice (deion sau cu efect de electrod), sau suflajul magnetic.

Tehnicile moderne de comutație în instalațiile de joasă tensiune validează pe de o parte principiile expuse în §7.1, care permit realizarea deconectării fără arc electric, dar pe de altă parte acceptă extinderea către domeniul tensiunilor joase a unor soluții performante, utilizate până acum doar la înaltă tensiune, cum ar fi comutația în vid.

7.2.1. Contactoare

Contactoarele sunt definite ca aparate electrice de comutație, cu o singură poziție de repaos, acționate altfel decât manual, capabile să conecteze, să suporte și să deconecteze curenții normali din circuitul în care sunt montate, inclusiv suprasarcinile de serviciu. Ținând seama de sursa de energie care asigură deplasarea contactelor mobile, se evidențiază două tipuri clasice de contactoare și anume:

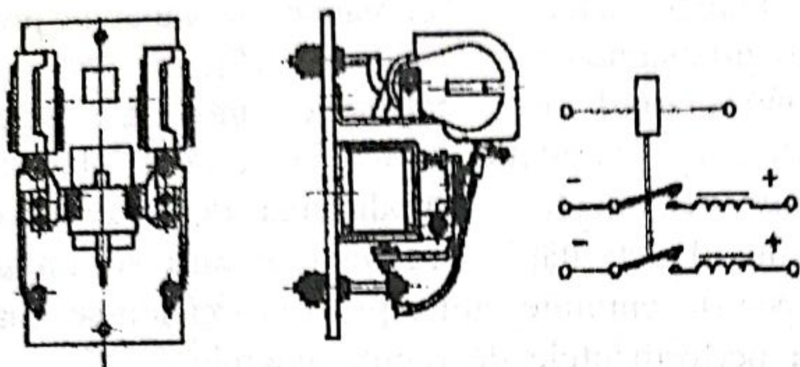


Fig.7.16
Contactor electromagnetic de c.c.

-contactoarele electromagnetice, cele mai răspândite, la care sursa de energie este, așa cum sugerează chiar numele, un electromagnet de curent continuu sau de curent alternativ, Fig.7.16 și Fig.7.17;

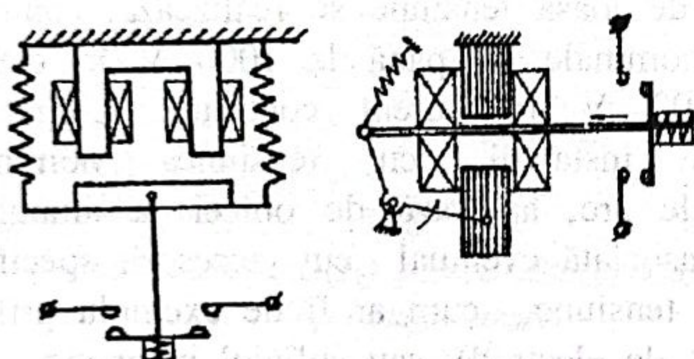


Fig.7.17
Contactor electromagnetic de c.a

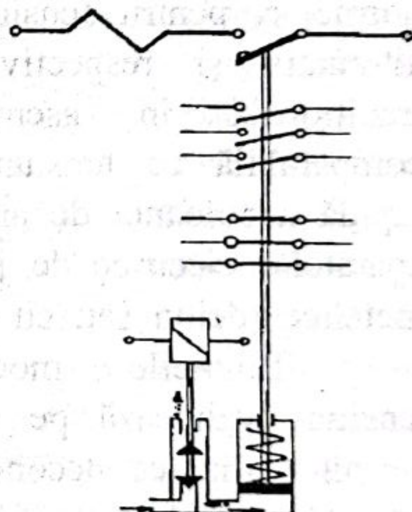


Fig.7.18
Contactor electropneumatic

-contactoarele electropneumatice, la care sursa de energie este un fluid sub presiune ce acționează asupra unui piston într-un cilindru convenabil calibrat, Fig.7.18.

Contactoarele electromagnetice de curent continuu (Tab.7.2) se realizează cu mișcare de rotație a armăturii mobile, în variantă monopolară sau bipolară, stingerea arcului electric de comutație fiind asigurată pe seama suflajului magnetic.

Se evidențiază și funcționalitatea de ruptor pentru care, la alimentarea circuitului electromagnetului de comandă, se obține deschiderea unui contact normal-închis în circuitul de forță.

Tab.7.2

Cod	U_n [V]	I_n [A]	Număr poli	Cont. auxiliare	Tip
3531	220	60	2	-	BC
3600	220	80	1	1ND, 2NI	RMC
3620	220	150	1	1ND, 1NI	RMC
5515	800	150	1	-	Contact. mecanic
5525	800	200	2	-	Contact. mecanic
3570	750	25	1	2ND, 2NI	MTU
3571	750	63	1	2ND, 2NI	MTU
3572	750	100	1	2ND, 2NI	MTU
3573	750	200	1	2ND, 2NI	MTU
9306	24	250	1(+1NI)	1ND, 1NI	EC
9307	24	250	1	-	EC
9308	80	160	1(+1NI)	1ND, 1NI	EC
9308A	80	160	1	1ND, 1NI	EC
9308B	80	160	1	-	EC
9309	24	250	1	1ND, 1NI	EC
8140	220	1	-	7NI	AB
8141	220	6	-	3NI	AB
9300	250	40	1	4	LDE
9310	250	40	1	3	LDE
9390	250	40	1	-	LDE
9315	250	40	2	3	LDE
9340	250	80	1	3	LDE
9342	250	80	2	3	LDE
9350	250	150	1	2	LDE
9360	250	150	2	2	LDE
9320	500	250	3	4	LDE
9321	500	250	3	4	LDE
9322	250	250	2	4	LDE
9330B	250	250	1	3	LDE
9330A	250	250	1	2	LDE
9370	175	1	-	4	LDE
9380	175	1	-	9	LDE
9220	110	1	-	9	LDE

Tab.7.2 (continuare)

9215	250	400	1	1	LDE
9217	250	400	2	1	LDE
9015	3000	16	1	5	LDE
9343	550	80	1	1	LMT
9344	550	80	2	1	LMT

Contactoarele electromagnetice de c.a. se realizează de obicei cu mişcare de translaţie a armăturii mobile, în variante tripolare sau, cu rezervare, în variante tetrapolare, pentru stingerea arcului electric de comutaţie folosindu-se principiul ruperii duble în camere de stingere cu grile metalice, Tab.7.3.

Tab.7.3

Tip	I_n [A]	P [kW]	Contacte auxiliare	Cod
AR	40	18,5	0-4 NI + 4-0 ND	8109
AR	63	30	0-4 NI + 4-0 ND	8110
AR	100	45	0-4 NI + 4-0 ND	8111
AR	160	90	0-4 NI + 4-0 ND	8112
AR	250	132	2(4)NI + 2(4)ND	8113
AR	400	220	2(4)NI + 2(4)ND	8114
AR	630	315	2(4)NI + 2(4)ND	8116
RG	40	18,5	2 NI + 2 ND	8169
RG	63	30	2 NI + 2 ND	8170
RG	125	55	2 NI + 2 ND	8171
RG	200	110	2 NI + 2 ND	8172
RG	250	132	2(4) NI + 2(4) ND	8173
RG	400	220	2(4) NI + 2(4) ND	8174

Pentru a realiza o utilizare mai judicioasă a posibilităţilor aparatului de comutaţie în exploatare s-a apelat la tipizarea, prin norme internaţionale, a domeniilor de utilizare posibile, adoptându-se în consecinţă tipodimensiuni specializate, în concordanţă cu aceste domenii de utilizare. Astfel, pentru contactoarele electromagnetice, normele C.E.I. 479-4-1 respectiv STAS 4479/74, prevăd categoriile de utilizare a contactoarelor electromagnetice prezentate în Tab.7.4.

Tab.7.4

Felul curentului	Categorie utilizare (Tip contactor)	Utilizări caracteristice
aternativ	AC-1	Sarcini neinductive sau slab inductive
alternativ	AC-2	Pornire, frânare, întrerupere motor asincron cu rotor bobinat
alternativ	AC-3	Pornire, oprire motoare asincrone cu rotor în scurtcircuit
alternativ	AC-4	Pornire, oprire, inversare sens, mers în şocuri pentru motoare asincrone cu rotor în scurtcircuit
alternativ	AC-5a	Comutarea lămpilor cu vapori de mercur
alternativ	AC-5b	Comutarea lămpilor cu incandescenţă
alternativ	AC-6a	Comutarea transformatoarelor
alternativ	AC-6b	Comutarea bateriilor de condensatoare
alternativ	AC-7a	Comutarea sarcinilor slab inductive pentru aplicaţii domestice şi similare
alternativ	AC-7b	Alimentarea motoarelor electrice pentru aplicaţii domestice şi similare
alternativ	AC-8a	Comanda pentru compresoare etanşe la instalaţii frigorifice
alternativ	AC-8b	Alimentarea cu reanclanşare automată a declanşatoarelor de suprasarcină
continuu	DC-1	Sarcini neinductive sau slab inductive
continuu	DC-2	Pornire, oprire pentru motoare derivaţie
continuu	DC-3	Pornire, oprire, inversare de sens pentru motoare derivaţie, comanda prin impulsuri a motoarelor de curent continuu
continuu	DC-4	Pornire, oprire pentru motoare serie
continuu	DC-5	Comanda prin impulsuri a motoarelor cu excitaţie serie, cu pornire, oprire, inversare sens
continuu	DC-6	Comutaţia lămpilor cu incandescenţă

Se menţionează că aceste categorii de utilizare se completează continuu cu noi situaţii de exploatare, ce impun în consecinţă realizări specializate de contactoare electromagnetice: în acest sens de exemplu, pentru ţările în care dubla tarifare a energiei

electrice se realizează prin telecomandă, s-au impus firesc contactoare specializate pentru asemenea instalaţii.

Trebuie menţionate de asemenea contactoarele electromagnetice de comandă, caracterizate prin valorile reduse ale curentului nominal, sub 10 A de obicei, care prin combinaţiile de conatcte normal deschise-normal închise sunt adaptate la utilizarea în schemele de comandă a instalaţiilor electrice.

Analizând parametrii funcţionali indicaţi în Tab.7.2. şi Tab.7.3. se pot remarca valorile mari, specifice contactoarelor, pentru durata de viaţă, circa 10^6 manevre, ca şi pentru frecvenţa de conectare, până la 3000 cicluri/oră, care le recomandă pentru utilizarea în instalaţii industriale automatizate cu funcţionare ciclică. Pentru a extinde încă gama utilizărilor, construcţiile actuale prevăd posibilităţi de ataşare a unor subansambluri tipizate interschimbabile, ce permit satisfacerea mai deplină a cerinţelor impuse de buna funcţionare a schemei în care sunt incluse, se pot astfel adăuga contacte auxiliare suplementare sau contacte auxiliare temporizate.

Contactoarele electropneumatice (Fig.7.18) s-au impus pentru utilizarea în tracţiunea electrică, cu variante monopolare de diferite tipodimensiuni. Detalii cu privire la performanţele acestor aparate de comutaţie sunt prezentate în Tab.7.5.

Tab.7.5

Cod	U_n [V]	I_n [A]	Număr poli	Cont.aux. ND-NI	Utilizare
9130	1000 cc	250	1	-	LE
9132	1000 cc	250	1	2 2	LDE
9180	1500 ca	500	1	3 3	LE
9160	1000cc+ca	1600	1	3 3	LE, metrou
9161	1200 cc	1600	1	3 3	autobasculantă
9400A	1000 cc	820	1	3 2	LDE
9400B	1000 cc	820	1	2 3	LDE

Utilizarea raţională a contactoarelor în schemele de distribuţie de joasă tensiune propune fie completarea acestora cu elemente de protecţie, rezultând contactoarele cu relee, fie asocierea acestora cu întrerupătoare automate de joasă tensiune (ce conţin

elementele de protecție necesare) obținându-se astfel ansambluri specializate funcțional, pentru alimentarea motoarelor respectiv a liniilor, livrate ca atare de firmele producătoare de aparate electrice de comutație.

Tehnicile moderne de comutație propun în domeniul contactoarelor în primul rând completarea construcțiilor clasice cu accesorii de sincronizare sau de preluare a conducției, asigurându-se comutația fără arc electric. In al doilea rând s-au impus contactoarele statice (fără contacte), care asigură comutația fără arc electric în circuite de joasă tensiune. Remarcabilă este și extinderea construcțiilor de aparate de comutație cu contacte în vid de tip contactor, pentru domeniul tensiunilor joase.

7.2.2. Contactoare cu comutație în vid

Principiul vidului avansat în incinta camerelor se stingere ale aparatelor electrice de comutație de curent alternativ, prezintă două particularități importante și anume:

-rigiditatea dielectrică foarte mare, conform legii lui Paschen, așa cum evidențiază și curbele prezentate în Fig.4.1, indicând dependența rigidității dielectrice în funcție de distanța dintre contacte, (pentru aer la presiunea de 1 bar, curba 1, pentru SF_6 la aceeași presiune, curba 2, respectiv pentru vid avansat, curba 3), dimensiunile de gabarit ale capsulelor vidate ce constituie camerele de stingere vor fi foarte reduse, ceea ce împreună cu masa redusă a ansamblului, se constituie în avantaje ale acestor contactoare;

-dezvoltarea arcului electric de comutație în incinta vidată cu vapori metalici proveniți din piesele de contact, construcția acestora (ca formă geometrică și material) fiind foarte importantă pentru realizarea unor aparate de comutație performante; cum tehnica vidului permite în prezent realizarea unor incinte vidate care-și conservă calitățile pentru o durată de 20...30 de ani, se consideră ca reușite realizările ce permit exploatarea deplină a posibilităților acestora, rezultând aparate de comutație practic fără întreținere.

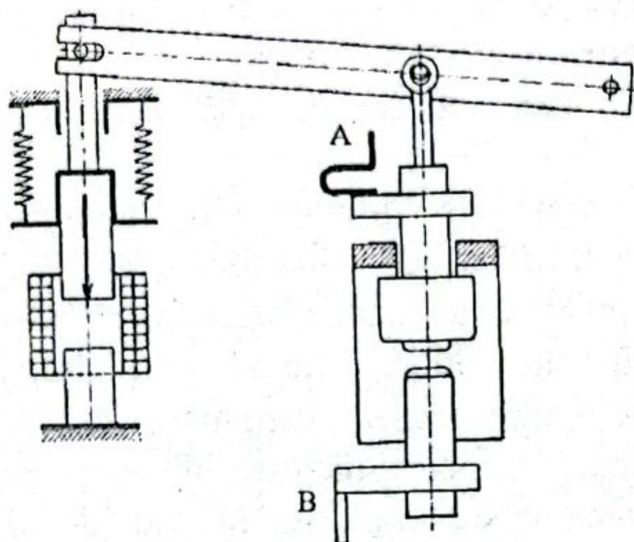


Fig.7.19
Contactor cu vid

Arcul electric format la separarea contactelor unor asemenea aparate electrice de comutaţie este o plasmă ce se dezvoltă în prezenţa vaporilor metalici, în condiţii de vid avansat în interiorul camerei de stingere. Difuzia vaporilor metalici şi condensarea acestora, în contact cu pereţii reci ai unor ecrane metalice convenabil amplasate, asigură refacerea rapidă a vidului, ce are ca efect tendinţa de tăiere a curentului de arc, aşa cuum se arată în căpitolul 4.

Construcţia îngrijită a contactelor electrice pentru aparatele cu comutaţie în vid avansat trebuie să asigure, în prezenţa arcului electric, o cantitate suficientă de vapori metalici, care să permită diminuarea valorilor curentului de tăiere, ca un indicator de calitate pentru asemenea ansambluri.

Calităţile contactoarelor cu comutaţie în vid avansat, subliniate de toate firmele producătoare, le impun pentru utilizari specializate cum ar fi:

- alimentarea motoarelor electrice;
- sisteme de comandă a acţionărilor electrice, pe seama valorilor ridicate ale curentului de rupere;
- alimentarea instalaţiilor electrice în medii explozive sau agresive din punct de vedere chimic, indiferent de altitudinea la care se găsesc acestea, deoarece arcul electric ce se manifestă în incinta vidată nu este influenţat de mediul ambiant;
-alimentarea sistemelor automate, unde durata mare de viaţă şi frecvenţa de conectare ridicată pot fi puse în valoare.

In principiu, un contactor cu comutaţie în vid avansat cuprinde, aşa cum se poate urmări în Fig.7.19, următoarele componente principale:

-capsulele vidate, în care sunt amplasate contactele electrice (în număr de 1, 2 sau 3 module), cu burdufurile metalice de

etanşare în zona contactelor mobile şi bornele de racord A respectiv B;

- electromagnetul de acţionare (de obicei de curent continuu, cu resort antagonist şi rezistenţă economizoare), care excitat asigură deplasarea dorită (de ordinul milimetrilor) a contactelor mobile; de menţionat că există firme care folosesc un singur electromagnet pentru toţi cei trei poli ai aparatului, dar se remarcă şi variante ce apelează la electromagneţi de acţionare pentru fiecare dintre modulele monofazate ale ansamblului;

- ansamblul de transmitere a mişcării de la electromagnetul de acţionare la contactele mobile, realizat cu pârghii mecanice sau cu cablu flexibil;

- accesorii de susţinere, ghidare şi izolaţie electrică, contacte auxiliare etc.

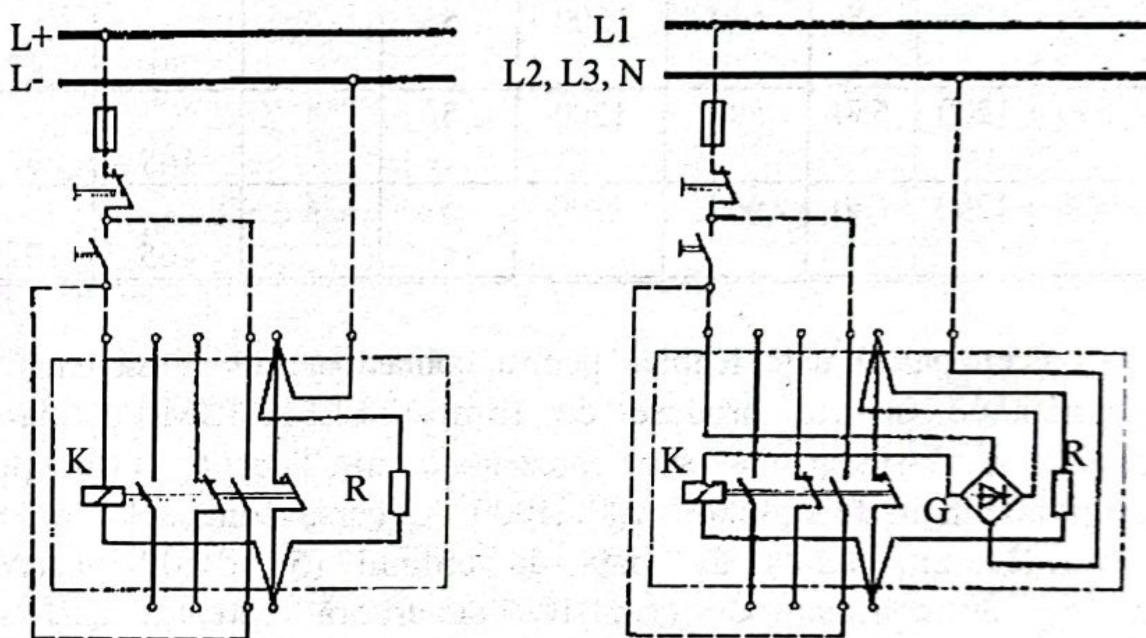


Fig.7.20

Scheme de comandă a electromagneţilor de c.c.

Schemele de comandă a electromagnetului de curent continuu folosit pentru acţionarea contactoarelor cu comutaţie în vid, pot fi alimentate de la surse de tensiune continuă sau alternativă (cu punte redresoare), incluzând în circuit rezistenţa economizoare, aşa cum se poate vedea în Fig.7.20.

Tab.7.6

Tipul	U_n [V]	I_n [A]	P [kW] (AC3)	f_c [cicl/h]	Uzura mec. [mil.]	Uzura electr. [mil.] (AC3)	$t_î$ [ms] cc ca	t_d [ms] cc ca
EVS160	1000	160	140	3000	5	5-7	- 30	20 30
EVS250	1000	250	220	3000	5	5	- 30	20 30
EVS400	1000	400	350	3000	5	5	- 30	15 22
EVS630	1000	630	560	3000	5	3	- 30	15 22
SV 400	1200	400	350	1200	5	4	- 80	- 18
SV 500	1200	500	400	1200	5	4	- 80	- 18
SV 550	1200	550	500	1200	5	4	- 165	- 32
SV 630	1200	630	600	1200	5	4	- 165	- 32

Principalele date tehnice pentru contactoare de joasă tensiune cu comutaţie în vid produse de firmele ELEKTRIM-Polonia şi respectiv EAW-Germania sunt prezentate în Tab.7.6, evidenţiind curenţi nominali de ordinul 100...1000 A, cursa contactelor mobile de 1,2...2 mm, durata de viaţă de ordinul $(5...10)10^6$ manevre, frecvenţa de conectare de $(1...3)10^3$ cicluri/oră, curentul tăiat sub 1,5 A, regimul de funcţionare de tip AC-1, AC-3 sau AC-4 etc. justificând astfel extinderea continuă a utilizării unor asemenea aparate electrice de comutaţie.

7.2.3. Contactoare cu comutaţie sincronizată

Aşa cum s-a arătat anterior, asemenea aparate electrice de comutaţie se realizează folosind un contactor, prin completarea

acestuia cu accesorii care asigură realizarea comutației fără arc electric.

Contactoarele sincronizate apelează la un dispozitiv de sincronizare, care sesizează trecerile naturale prin zero ale curentului alternativ din circuit. Deoarece împrăștierea valorilor timpului de răspuns, de la momentul comenzii de deconectare până la momentul desprinderii pieselor de contact, trebuie să fie nesemnificativă în raport cu semiperioada tensiunii alternative a sursei de alimentare a circuitului (0,01 s). Sunt preferate contactoarele cu comutație în vid, caracterizate prin valori reduse ale cursei contactelor mobile, electromagnetul de acționare de curent continuu fiind un argument pentru această opțiune.

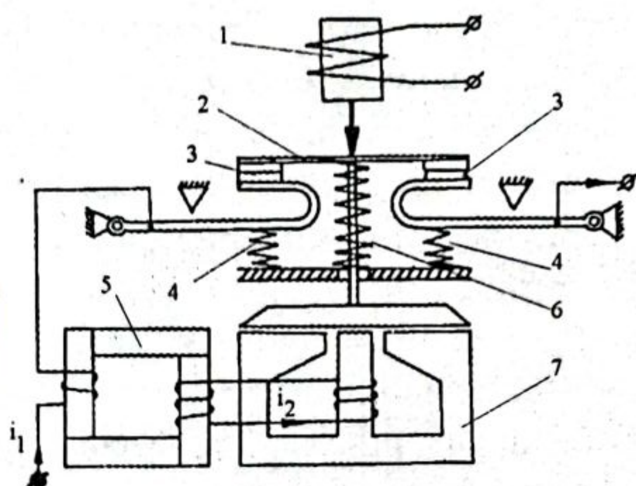


Fig.7.21
Contactor sincronizat

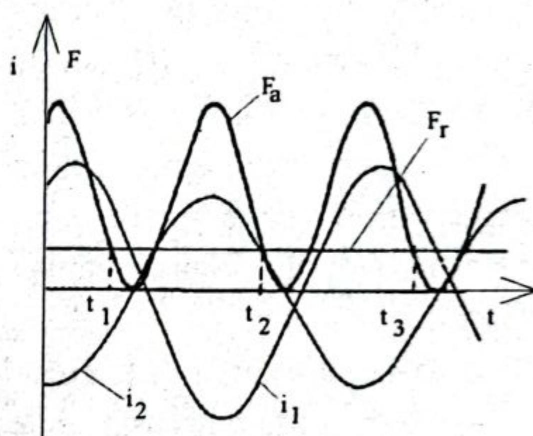


Fig.7.22
Evoluția parametrilor în timp

Clasificarea contactoarelor sincronizate ține seama de obicei de tipul constructiv de realizare a dispozitivului de sincronizare. Schema de principiu a unui asemenea contactor cu dispozitiv electromagnetic de sincronizare este dată în Fig.7.21 și evidențiază următoarele elemente componente:

-contactorul electromagnetic cu electromagnetul de acționare 1, puntea contactelor mobile 2, contactele fixe 3, resorturile precomprimate 4 și resortul de deschidere 6, care se tensionează în timpul manevrei de conectare;

-ansamblul de sincronizare, care sesizează trecerile naturale prin zero ale curentului din circuit, ce folosește transformatorul de adaptare 5 și electromagnetul de sincronizare 7.

Funcţionarea unui asemenea contactor cu sincronizare electromagnetică a deconectării, Fig.7.22, decurge astfel: la întreruperea alimentării electromagnetului de acţionare 1, traversa contactelor mobile este menţinută în poziţia acţionat datorită electromagnetului de reţinere 7, cu bobina parcursa de curentul $i_2(t)$, furnizat prin intermediul transformatorului de adaptare 5, a cărui înfăşurare primară este în serie cu circuitul principal de curent $i_1(t)$. Dependenţa în funcţie de timp a forţei de atracţie exercitate de electromagnetul 7 asupra armăturii sale mobile, cu treceri prin zero simultane cu cele ale curentului $i_2(t)$, pune în evidenţă posibilitatea deschiderii contactelor 2, 3 ale aparatului în unul din momentele t_1, t_2, t_3,..., în care forţa electromagnetică de menţinere, F_a, este egală cu forţa resorturilor antagoniste, F_r. In momentul t_3 de exemplu, anterior trecerii naturale prin zero a curentului din circuitul principal, $i_1(t)$, se începe mişcarea traversei 2 a contactelor mobile. Pentru a se obţine deconectarea sincronizată este desigur necesar ca deschiderea contactelor aparatului să intervină exact în momentul trecerii prin zero a curentului din circuitul principal, ajustarea bunei funcţionări asigurându-se fie pe seama inerţiei mecanice mari a contactelor fixe 3, ce au masa suficient de mare, fie prin modificarea întrefierului transformatorului de adaptare 5.

De remarcat faptul că dacă timpul propriu de răspuns al dispozitivului de acţionare al contactorului este mare se poate amâna deconectarea sincronizată la o trecere ulterioară prin zero a curentului din circuitul principal.

Pe lângă contactoarele sincronizate prezentate, în staţiile de încercări de mare putere, atât la joasă tensiune cât şi la înaltă tensiune, se utilizează contactoare sincrone, capabile să asigure conectarea cu fază controlată a unor circuite în scopul reproducerii curenţilor de scurtcircuit din exploatare [15]. Contactorul sincron, care are numai capacitate de conectare, este utilizat la determinarea caracteristicii de limitare a siguranţelor fuzibile pentru curent simetric şi asimetric, la verificarea capacităţii de deconectare a întrerupătoarelor şi în vederea determinării stabilităţii dinamice a acestora.

Principalele părţi componente ale unui contactor sincron de joasă tensiune (100 kA_{ef}, 1100 V, dispersie la conectare sub 5^o

electrice (10^{-4}s), timp de acţionare 8 ms), sunt prezentate în Fig.7.23, remarcându-se:

-electromagnetul de menţinere cu magnetul permanent 1, coloanele 2a şi 2b, ce prezintă istmuri magnetice de secţiune transversală scăzută care favorizează saturaţia, şuntul magnetic 3 şi bobina de excitaţie 4, amplasată în zona istmurilor dispuse pe coloanele 2a respectiv 2b, armătura mobilă a electromagnetului, 5;

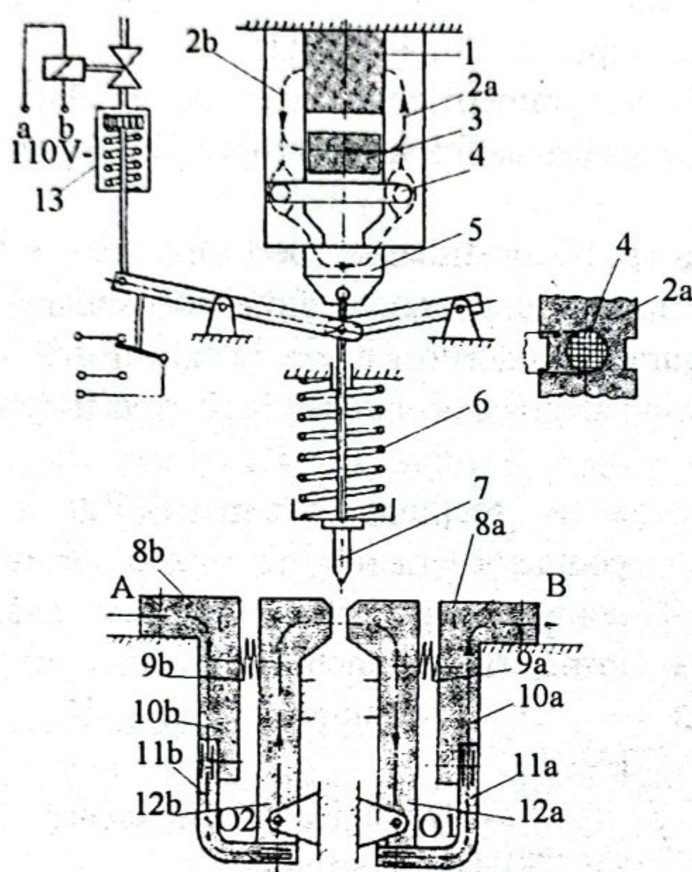


Fig.7.23
Contactor sincron de j.t.

-contactul mobil 7, asupra căruia acţionează resortul 6, comprimat anterior, cursa de conectare a acestuia fiind posibilă atunci când, datorită unui impuls de curent prin bobina de excitaţie 4, armătura mobilă a electromagnetului, 5, este eliberată; deschiderea (fără sarcină) a circuitului şi rearmarea resortului 6 este asigurată de dispozitivul electropneumatic 13; menţinerea armăturii mobile 5 în poziţia iniţială, indicată în figură, se datorează forţei portante rezultate corespunzător inducţiei remanente a magnetului permanent;

-calea de curent a aparatului, cu un contur specific pentru aparatele de curenţi nominali mari, ce are ca scop favorizarea interacţiunilor electrodinamice care se manifestă ca forţe de apăsare pe contact, cuprinde bornele de racord A şi B, piesele de contact 12a respectiv 12b între care legătura electrică se realizează prin cuţitul mobil de contact 7, conductoarele flexibile 11a şi 11b, piesele fixe de contact 10a respectiv 10b; resoartele 9a şi 9b

asigură forța necesară de apăsare pe contact pentru valori reduse ale curentului, sub 10 kA.

Principalele probleme care se pun pentru realizarea unor contactoare sincrone performante sunt:

-stabilirea riguroasă a punctului de funcționare pentru magnetul permanent astfel încât să se obțină saturația magnetică a istmurilor de pe coloanele 2a respectiv 2b, Fig.7.23;

- alegerea convenabilă a parametrilor bobinei de excitație 4 și a soluției de alimentare a acesteia astfel încât timpul de acționare să fie cât mai redus;

- adoptarea unei variante constructive performante pentru contactele contactorului sincron, evitându-se tendința de sudare în poziția închis atât prin asigurarea valorilor necesare ale forței de apăsare pe contact cât și prin alegerea convenabilă a materialelor acestora.

In Fig.7.24 se prezintă o secțiune schematică a unui contactor sincron de medie tensiune construit de firma A.E.G. și având următorii parametri nominali:

- tensiunea nominală: 24 kV;

- tensiunea de încercare: 55 kV, 50 Hz, 1 minut;

- stabilitatea electrodinamică: 400 kA_{max};

- stabilitatea termică: 100 kA, 3 s;

- timp de acționare: 5 ms;

- dispersia maximă: 10^{-4} s;

- sursa de energie pentru acționare: aer comprimat la 2 MPa.

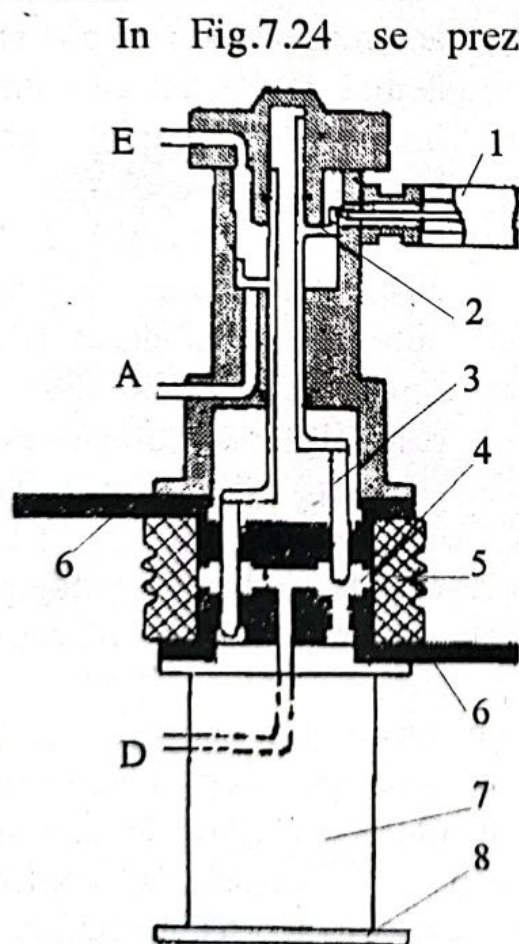


Fig.7.24
Contactor sincron de m.t.

Principalele părți componente ale acestui contactor sunt: dispozitivul de zăvorâre în starea deschis 1, pistonul mobil 2, solidar cu contactele mobile de scurtcircuitare de tip bară 3,

contactele fixe 4, izolaţia electrică a camerei de conectare 5, bornele de racord 6, izolatorul suport 7, placa de fixare 8. Funcţionarea ansamblului la conectare are la bază deplasarea pistonului şi a contactelor mobile către contactele fixe sub acţiunea aerului comprimat care intră prin racordul E şi este evacuat prin racordul A.

7.2.4. Contactoare cu comutaţie hibridă

Schema de principiu pentru un contactor monofazat cu comutaţie hibridă la deconectare este dată în Fig.7.25. Comanda trecerii în conducţie a tiristoarelor T_1 sau T_2, în funcţie de polaritatea momentană a sursei alternative de alimentare a circuitului u(t), se realizează cu ajutorul transformatorului de curent TC cu două înfăşurări secundare, N_1 şi N_2, al cărui primar este chiar calea de curent a aparatului de comutaţie.

De remarcat că prin apăsarea butonului de oprire O se întrerupe alimentarea bobinei electromagnetului de acţionare EMA

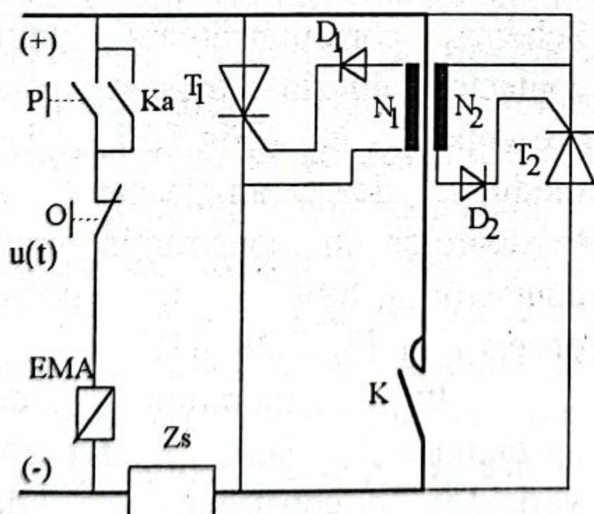


Fig.7.25
Contactor cu comutaţie hibridă

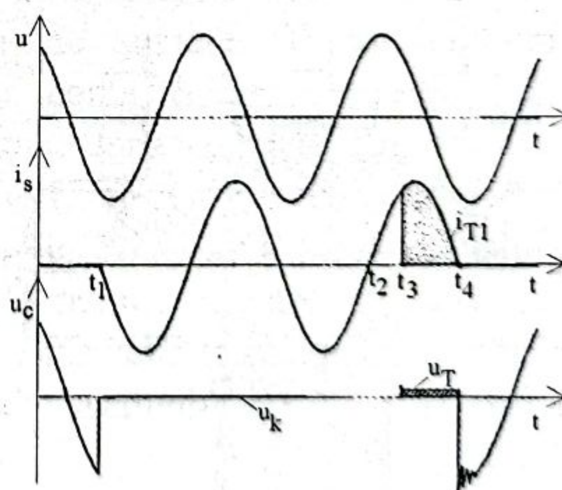


Fig.7.26
Variaţia în timp a semnalelor

astfel încât, după deschiderea contactului principal K şi preluarea conducţiei prin unul dintre tiristoare (T_1 în cazul indicat în Fig.7.25), înfăşurarea primară a transformatorului de curent TC nu

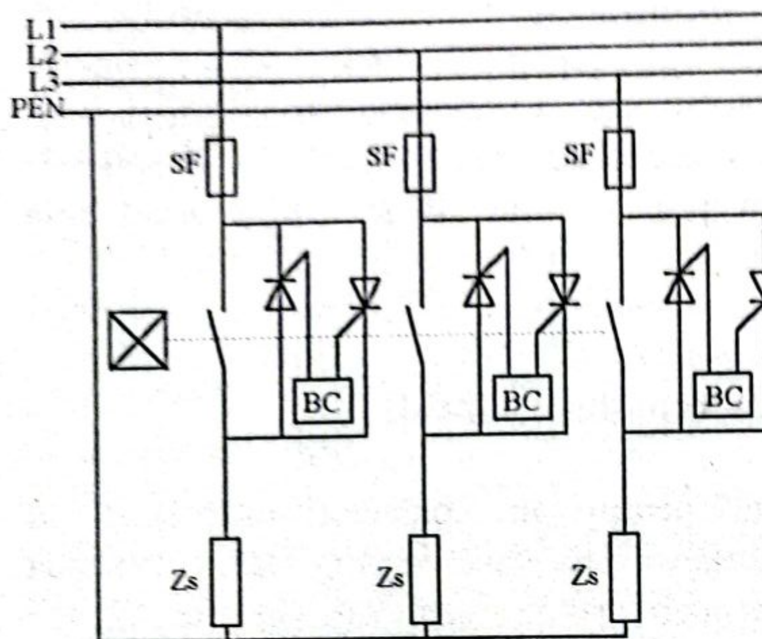


Fig.7.27
Contactor hibrid trifazat

mai este parcurs de curent și, după o semiperioadă, intervine întreruperea alimentării consumatorului Z_S.
Evoluția în timp a mărimilor caracteristice (tensiunea sursei, curentul din circuitul de sarcină, curentul care parcurge tiristorul T_1, tensiunea la bornele contactului care se deschide) sunt indicate în Fig.7.26, momentul t_1 corespunzând închiderii contactelor aparatului iar intervalul de timp t_3-t_4 reprezentând durata conducției tiristorului.
Schema corespunzătoare unui contactor hibrid trifazat este prezentată în Fig.7.27, iar modul de amplasare a tiristoarelor în construcția unui contactor hibrid se poate observa în Fig.7.28, [10].

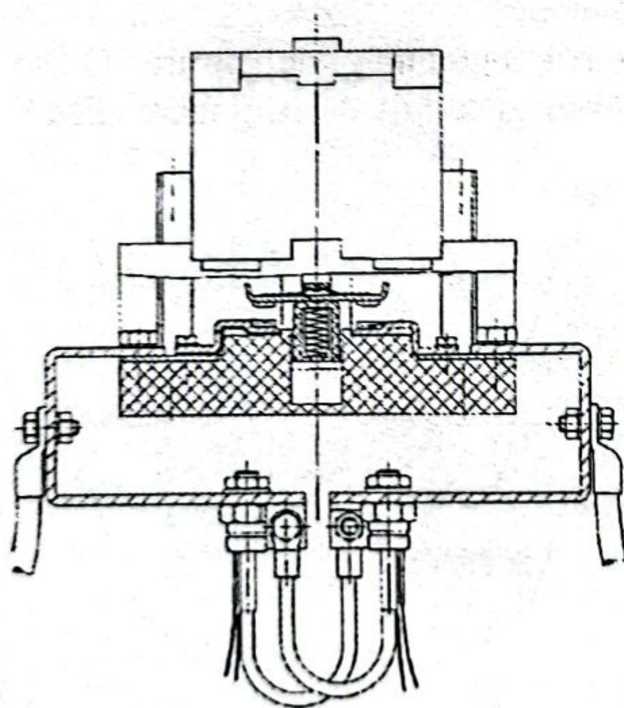


Fig.7.28
Modul de montare a tiristoarelor

In literatura de specialitate sunt indicate variante constructive de contactoare cu comutație hibridă ce țin seama de tipul de contactor electromagnetic ce stă la baza ansamblului. Se remarcă astfel soluții pentru a realiza comutația hibridă pentru aparatele de comutație cu contacte mobile de rotație și rupere simplă

respectiv pentru aparate de comutaţie cu contacte mobile cu mişcare de translaţie şi rupere dublă.

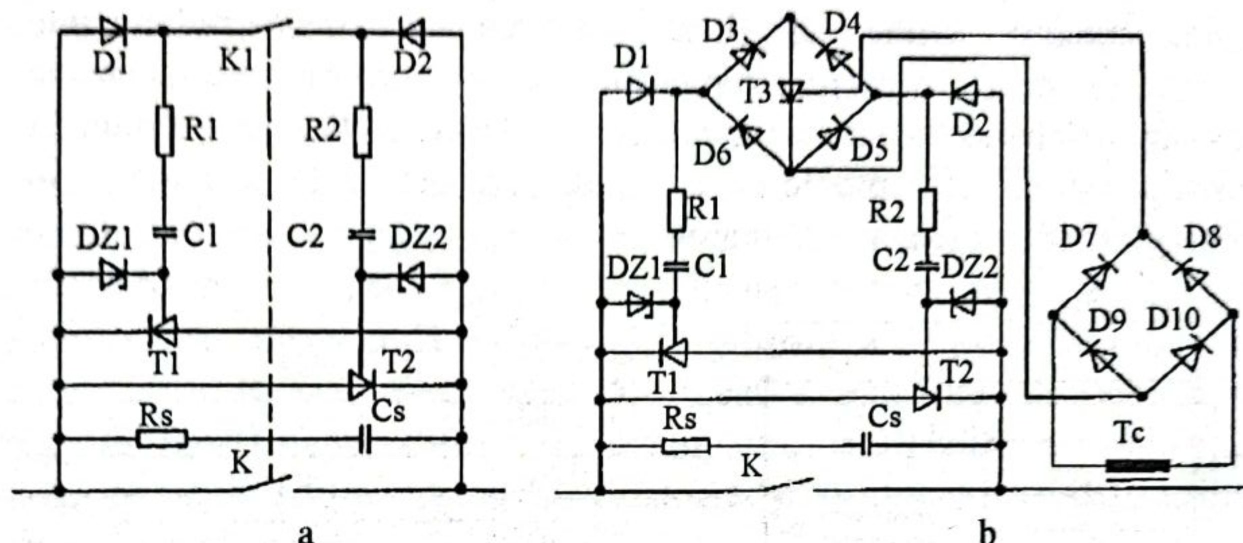


Fig.7.29

Contactor hibrid cu mişcare de rotaţie: a-cu contacte auxiliare; b-fără contacte auxiliare.

In Fig.7.29 se prezintă posibilităţi de realizare a comutaţiei hibride pentru cazul contactelor mobile cu mişcare de rotaţie, ce folosesc sau nu un contact auxiliar al aparatului pentru a comanda trecerea în conducţie a tiristoarelor de şuntare. Trebuie subliniat faptul că atunci când se folosesc contacte auxiliare, Fig.7.29a, acestea trebuie să se deschidă totdeauna după contactele principale.

Schema unui contactor hibrid ale cărui contacte au o mişcare de translaţie este dată în Fig.7.30, indicându-se alăturat, Fig.7.31, succesiunea de secvenţe ce trebuie impusă cu privire la comutaţia celor două secţiuni ale contactelor principale, secţiunea K_2 trebuind să se închidă înaintea secţiunii K_1 dar şi să se deschidă totdeauna după aceasta.

Funcţionarea tiristoarelor care intervin în schemele de contactoare de curent alternativ cu comutaţie hibridă evidenţiază următoarele situaţii posibile:

-regimul deconectat al aparatului cu comutaţie hibridă, când tiristoarele de şuntare trebuie să suporte tensiunea alternativă a sursei de alimentare şi supratensiunile datorate unor cauze exterioare;

-regimul conectat al contactorului hibrid, când pe tiristoare se regăseşte doar căderea de tensiune pe contactele aparatului, sub 100 mV, astfel încât regimul termic al acestor tiristoare este definit de temperatura ambiantă, permiţând renunţarea la radiatoarele aferente şi deci reducerea dimensiunilor de gabarit, ceea ce se constituie într-un avantaj comutaţiei hibride faţă de comutaţia statică; principalele pierderi în acest regim sunt localizate în circuitul de comandă al tiristoarelor.

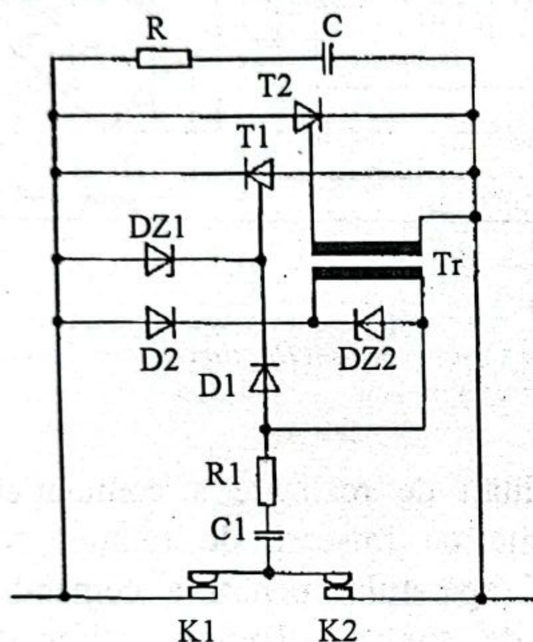


Fig.7.30
Contactor hibrid cu mişcare de translaţie

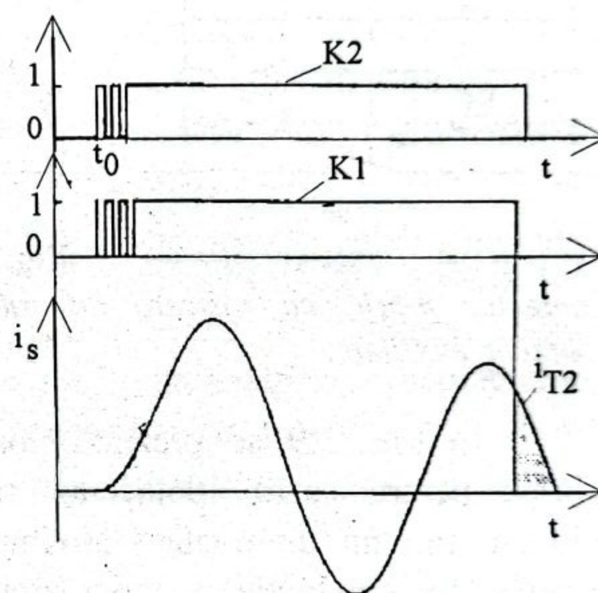


Fig.7.31
Secvenţa de deschidere

-regimul de comutaţie, când unul dintre tiristoarele de şuntare este parcurs de un impuls de curent având o durată de maximum o semiperioadă.

De remarcat faptul că în funcţionarea aparatelor electrice cu comutaţie hibridă tiristoarele pot fi utilizate la curenţi de valori mai mari decât în cazul comutaţei statice. Informaţiile din literatura de specialitate confirmă deplin această constatare, indicând creşteri ale temperaturii medii a tiristoarelor la funcţionarea ciclică de circa 20...30°C şi căderi ale acestora, la funcţionarea contactoarelor cu comutaţie hibridă un număr de 5...10 milioane de manevre, doar în proporţie de (6...12)%, pentru valori ale curentului din circuit de (8...10) ori mai mari decât curentul nominal al tiristoarelor utilizate, [20].

Analiza informaţiilor menţionate în literatura de specialitate, [3], [10], [20], indică faptul că importanta problemă a comenzii semiconductoarelor de tip tiristor sau triac ce asigură preluarea conducţiei în cazul comutaţiei hibride nu are o soluţie unică, unanim acceptată.

Există astfel scheme care propun comanda trecerii în conducţie a semiconductoarelor de şuntare prin controlarea valorilor curentului din circuit, aşa cum se poate observa în Fig.7.25, folosindu-se în acest scop un transformator de curent TC. Amplasarea convenabilă a înfăşurării primare a transformatorului de curent TC, de fapt chiar calea de curent a aparatului de comutaţie, asigură funcţionarea corectă a ansamblului, cu preluarea conducţiei doar pe unul dintre cele două tiristoare şi pentru o durată maximă de o semiperioadă.

Realizările ilustrate prin schema dată în Fig.7.29a asigură trecerea în conducţie a tiristoarelor de şuntare pe seama tensiunii de la bornele contactului principal.

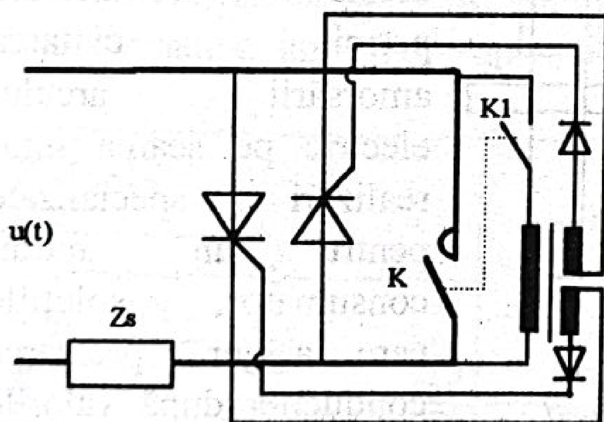


Fig.7.32
Contactor hibrid comandat cu un transformator ridicător de tensiune

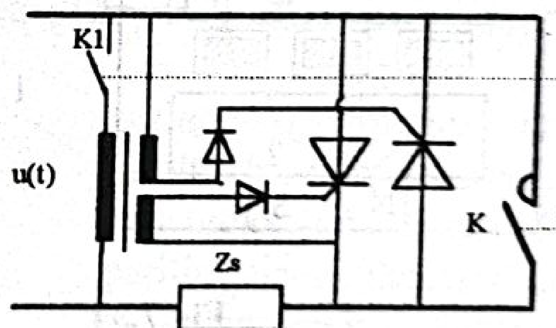


Fig.7.33
Contactor hibrid comandat după tensiunea de alimentare

Efecte favorabile pentru obţinerea comutaţiei fără arc electric rezultă prin utilizarea unui transformator ridicător de tensiune, al cărui primar este alimentat cu tensiunea de la bornele contactului principal, astfel încât înfăşurarea secundară asigură tensiunea de comandă a tiristoarelor de şuntare chiar pentru valori ale tensiunii primare inferioare tensiunii minime de arc. O asemenea

variantă de contactor cu comutaţie hibridă este prezentată în Fig.7.32.

Destul de răspândite dar mai puţin eficiente sunt contactoarele hibride la care comanda trecerii în conducţie a tiristoarelor de şuntare se realizează după tensiunea de alimentare a circuitului, aşa cum se poate observa în schema din Fig.7.33.

O soluţie frecvent utilizată pentru comanda trecerii în conducţie a tiristoarelor de şuntare din construcţia contactoarelor hibride apelează la contacte comandate magnetic (reed). Circuitul magnetic 1, Fig.7.34, în care intervine şi magnetul permanent 3, asigură închiderea contactelor reed 4, doar atâta timp cât curentul care parcurge căile de curent ale aparatului de comutaţie 2 realizează saturaţia magnetică a porţiunii 7 a miezului. Pentru a diminua componenta variabilă a fluxului magnetic, mai ales la utilizarea monofazată, se folosesc înfăşurările în scurtcircuit 5.

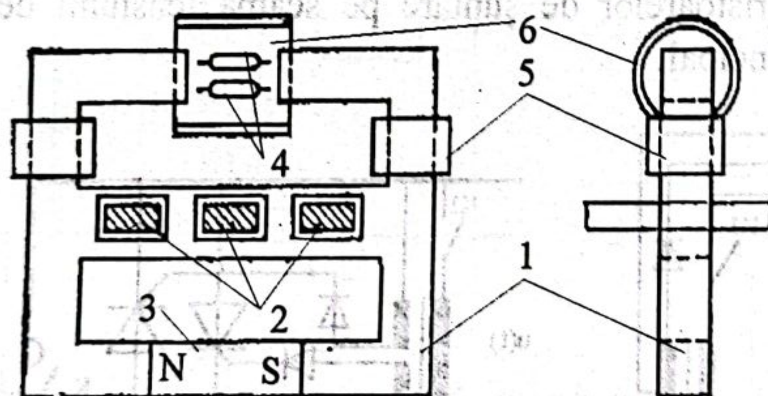


Fig.7.34
Dispozitiv de comandă cu relee reed

Trebuie în final menţionat faptul că aceste contactoare permit evitarea amorsării arcului electric pe seama unor realizări specializate pentru un anumit consumator, soluţiile care asigură preluarea conducţiei după valorile curentului din circuit anunţând o adaptare mai comodă la natura sarcinii din circuit. In plus utilizarea practică a unor asemenea contactoare cu comutaţie hibridă impune şi rezolvarea problemelor legate de protecţia tiristoarelor contra supratensiunilor de comutaţie respectiv împotriva efectelor curenţilor de scurtcircuit.

Protecţia contra supratensiunilor se realizează cu mijloace tipice (circuite RC conectate în paralel cu tiristoarele de şuntare, descărcătoare cu oxizi metalici etc).

Protecţia contactoarelor hibride la acţiunea curenţilor de scurtcircuit urmăreşte evitarea distrugerii contactelor contactorului ca

urmare a vibraţiilor cauzate de forţele electrodinamice, mari în regim de defect, ce conduc la amorsări şi stingeri repetate ale arcului electric între piesele de contact. In acest scop se poate opta pentru una din soluţiile enumerate mai jos:

-utilizarea unor tiristoare cu curent nominal superior curentului nominal al contactorului, capabile să suporte timp de 10 ms curentul maxim din circuit;

-utilizarea în circuitul tiristoarelor de şuntare a unor rezistenţe de limitare, evitându-se înrăutăţirea comportării ansamblului la comutaţia normală, la I_n;

-întreruperea comenzii de trecere în conducţie a tiristoarelor de şuntare atunci când contactele principale ale aparatului sunt închise, pentru a proteja tiristoarele, acceptând uzura excesivă a contactelor datorată vibraţiilor;

-utilizarea unor contacte de construcţie specială, autocompensate la acţiunea forţelor electrodinamice ăn regim de defect;

-utilizarea, în serie cu tiristoarele de şuntare a unor siguranţe fuzibile sau a unor întrerupătoare ultrarapide cu limitare de curent.

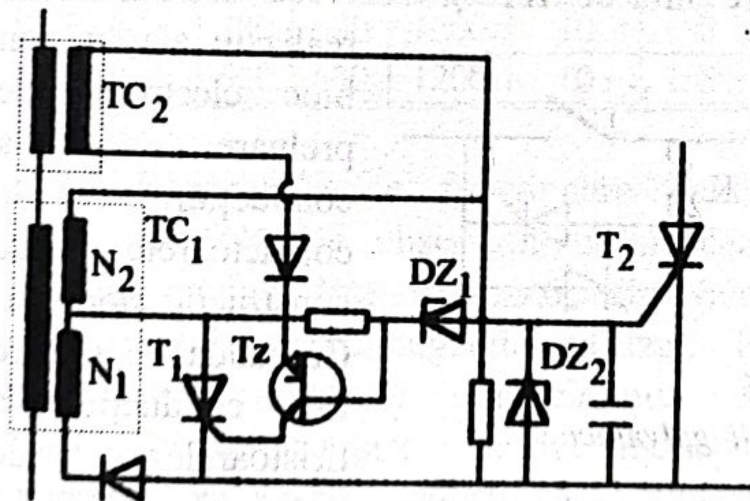


Fig.7.35

Schemă pentru blocarea tiristoarelor de şuntare la apariţia curenţilor de scurtcircuit

In Fig.7.35 se prezintă o soluţie care permite blocarea comenzii tiristoarelor de şuntare la apariţia unor defecte de tip scurtcircuit. Schema de comandă a trecerii ăn conducţie a unuia dintre tiristoarele de şuntare, T_2, conţine transformatoarele de curent TC_1, TC_2 ($N_1 > N_2$).

In regim normal de funcţionare, pentru valori ale curentului din circuit sub 10 I_n, tiristorul de şuntare T_2 este comandat dar nu trece în stare de conducţie deoarece tensiunea la borne, de fapt căderea de tensiune pe contactele principale, este prea mică. In cazul unui regim de scurtcircuit, deci pentru valori

ale curentului de $(12...15)I_n$, tiristorul de mică putere T_1 și tranzistorul Tz trec în stare de conducție, asigurând întreruperea aplicării semnalelor de comandă pe circuitul de poartă al tiristorului T_2. Transformatorul de curent TC_2, furnizează o tensiune suplimentară pe dioda DZ_1, ceea ce permite evitarea căderilor schemei la viteze mari de creștere a curentului de defect.

Atunci când utilizarea contactoarelor cu comutație hibridă impune separarea galvanică între sursa de alimentare și consumator în situația deconectat, se apelează la un pol separator suplimentar sau la contacte auxiliare care se deschid la trecerea prin zero a curentului ce parcurge unul dintre tiristoarele de șuntare. Exemple de realizare a separării galvanice dintre sursa de energie și consumator sunt ilustrate în Fig.7.36. Realizarea industrială a unor contactoare cu comutație hibridă pentru curent alternativ a reprezentat o preocupare importantă a unor firme de renume din întreaga lume, de la Klökner Moeller (Germania) la SEM (Franța) sau Findlay Orvine Ltd. (Anglia). De menționat de asemenea seriile de contactoare hibride KT și KTP realizate în Rusia.

Seriile de contactoare hibride KT și KTP de exemplu sunt realizate atașând un bloc electronic de preluare a conducției la contactoarele de construcție normală. Comanda de trecere în conducție a tiristoarelor de șuntare folosește transformatoare de curent cu două înfășurări secundare pe fiecare din cele trei faze, primarul fiind chiar calea de curent a aparatului de comutație. Protecția tiristoarelor la supratensiuni se realizează clasic, cu circuite RC conectate în paralel. Lungimea maximă a conductoarelor ce asigură conexiunile dintre blocul de preluare a conducției și aparatul de comutație nu trebuie să depășească 1,5 m. Valoarea minimă a curentului din circuit pentru care se realizează comutația fără arc electric cu o

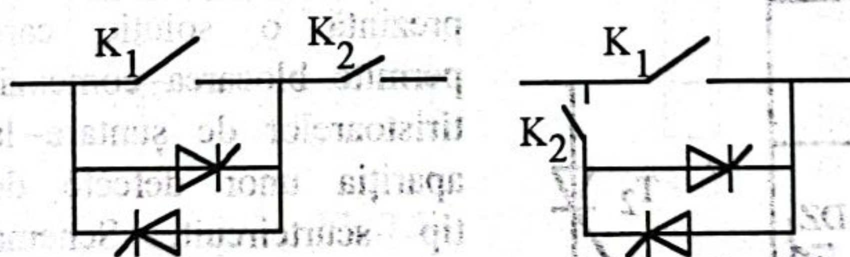


Fig.7.36

Realizarea separării galvanice

probabilitate de 0,8 se dovedeşte a fi de circa trei ori mai mică decât cele indicate în Tab.7.7.

Tab.7.7

Tipul	U_n [V]	I_n [A]	f_c [c/h]	Uzură mec. [mil]	Uzură el. [mil]	Masa [Kg]	I_{sc} [kA]	t_d [ms]	I_{min} [A]
KT64-33	380	160	1200	10	5	17,9	8	12	25
KT65-33	660	160	1200	10	5	19,4	9	12	25
KT64-35	380	250	1200	10	5	36	13	12	35
KT65-35	660	250	1200	10	5	36	13	12	35
KT64-37	380	400	600	5	5	72	19	20	35
KT65-37	660	400	600	5	5	72	19	20	35
KT64-39	380	630	600	5	5	94	20	20	105
KT65-39	660	630	600	5	5	94	20	20	105
KTP64-33	380	160	2000	16	5	21,6	8	12	25
KTP64-33	660	160	2000	16	5	23	9	12	25
KTP64-35	380	250	2000	10	5	41,5	13	12	35
KTP65-35	660	250	2000	10	5	41,5	13	12	35
KTP64-37	380	400	1200	10	5	72	19	20	35
KTP65-37	660	400	1200	10	5	72	19	20	35
KTP64-39	380	630	1200	10	5	102	20	20	105
KTP65-39	660	630	1200	10	5	102	20	20	105

Regimurile de funcţionare pentru aceste contactoare sunt AC3 sau AC4, cu observaţia că în cazul regimului AC4 curentul nominal devine doar (0,4...0,6) din valoarea curentului nominal al contactorului electromagnetic utilizat. Pentru a evita înrăutăţirea transferului curentului din circuitul contactelor aparatului către tiristoarele de şuntare datorită inductivităţii înfăşurării de suflaj magnetic, se preferă construcţiile cu camere de stingere cu grile metalice. O atenţie deosebită se acordă dispozitivelor electromagnetice de acţionare a contactoarelor hibride, preferându-se soluţii care asigură reducerea şocurilor, a vibraţiilor şi a uzurii acestora în acelaşi timp cu diminuarea gabaritului şi a preţului lor de cost.

Contactoarele cu comutaţie hibridă din seria N realizată de firma SEM (Franţa) folosesc contactoare electromagnetice de serie în paralel cu care se montează tiristoare şi diode. Comanda de

trecere în conducție a tiristoarelor de șuntare apelează la contacte auxiliare ale contactoarelor de bază ce permite utilizarea în circuitul de poartă al tiristoarelor a tensiunii redresate obținute în înfășurările secundare ale unor transformatoare de tensiune. Cele patru tiopodimensiuni realizate funcționează la curenți nominali de până la 1000 A.

Contactoarele cu comutație hibridă din seria DIL (42-Hy, 62-Hy și 82-Hy) produse de firma Klökner Moeller din Germania folosesc contactoare electromagnetice de serie în paralel cu care se montează triacuri și siguranțe fuzibile. Comanda semiconductoarelor de preluare a conducției folosește de asemenea contacte auxiliare ale aparatului de bază și se realizează după valorile tensiunii. Se utilizează controlul temperaturii triacurilor cu ajutorul unor termistoare. Tipodimensiunile realizate sunt de curenți nominali de 250A, 300A și 400A la 380 V, cu masele de 40, 42 și 48 Kg, având dimensiunile de gabarit de 400x700x300 mm. Frecvența de conectare maximă este de 600 conectări/oră, pentru un număr de 3 milioane de manevre și cu valoarea maximă admisibilă a curentului de scurtcircuit de 40 kA.

Deși în mod obișnuit comutația hibridă se referă la circuite de curent alternativ, în ultimul timp s-au impus soluții similare pentru a asigura comutația în circuite de curent continuu. Literatura de specialitate [17], [20], semnalează două tipuri de scheme de contactoare hibride de curent continuu și anume:

-scheme pentru care intervine, cu o durată limitată, arderea arcului electric de întrerupere;

-scheme cu comutație pe deplin fără arc electric.

In Fig.7.37 sunt ilustrate câteva variante de scheme aparținând primei categorii dintre cele două amintite mai sus. Corespunzător schemei date în Fig.7.37a, după deschiderea contactului și amorsarea arcului electric, se realizează descărcarea condensatorului, prin comanda trecerii în conducție a tiristorului, astfel încât se asigură schimbarea polarității curentului rezultant prin contact și la trecerea prin zero a acestuia se obține stingerea arcului, respectiv întreruperea circuitului. Gama de curenți pentru care se realizează asemenea scheme se definește din condiția de

refacere a rigidității electrice dintre piesele de contact după prima trecere prin zero a curentului rezultant u_r, dată de relația, [20]:

$$u_r = U_0 + k_0 t, \tag{7.7}$$

unde tensiunea inițială de ținere, U_0 și respectiv viteza de creștere a rigidității dielectrice, k_0 au valori ce depind de curentul din circuit, de materialul contactului și de distanța dintre piesele de contact în poziția deschis.

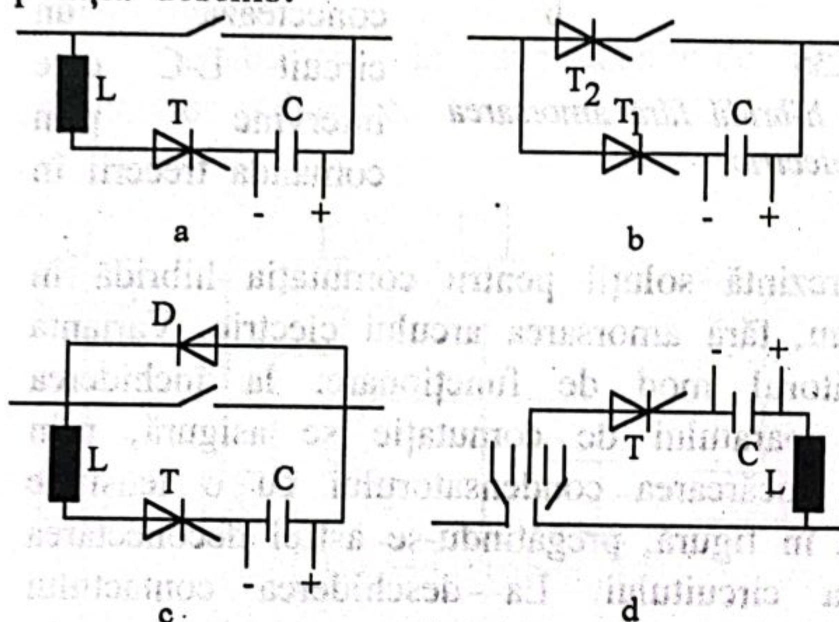
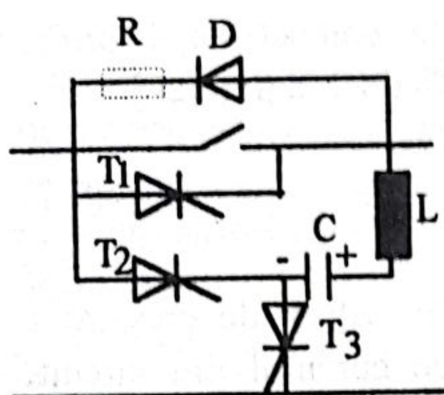


Fig.7.37

Scheme pentru comutația hibridă cu amorsarea pe o durată limitată a arcului electric

Se remarcă faptul că, pentru valori ale curentului peste 100A, odată cu micșorarea valorilor U_0 și k_0 intervine și creșterea valorilor capacității, cu efecte nefavorabile atât din punct de vedere al gabaritului respectiv al prețului de cost cât și cu privire la performanțe.

Principalul dezavantaj al unei asemenea scheme îl constituie rezistența mică la uzură, deoarece funcționarea presupune acceptarea amorsarii arcului electric. O soluție mai reușită este propusă în Fig.7.37b, unde trecerea în conducție a tiristorului și descărcarea condensatorului asigură blocarea avantajoasă a diodei amplasate în serie cu contactul principal, permițând diminuarea valorii capacității condensatorului. La valori mici ale curentului din circuit, sub 10 A, pierderile de putere în diodă micșorează eficiența unei asemenea scheme. Amplasarea unei diode în paralel cu contactul principal (Fig.7.37c) face ca pe durata descărcării condensatorului C, la bornele contactului să se manifeste căderea de tensiune directă de pe dioda de șuntare, aflată în conducție.



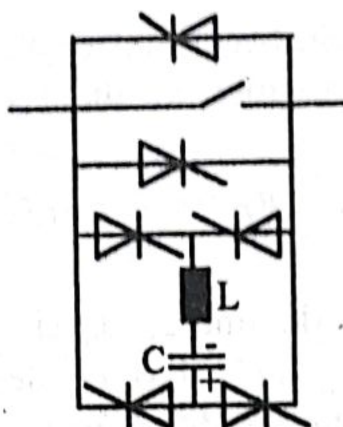


Fig.7.38

Scheme pentru comutația hibridă fără amorsarea arcului electric

Schema propusă în Fig.7.37d permite reducerea valorii capacității C prin aceea că între rețeaua de grile a camerei de stingere și piesele de contact se conectează un circuit L-C care intervine prin comanda trecerii în conducție a unui tiristor.

In Fig.7.38 se prezintă soluții pentru comutația hibridă în circuite de curent continuu, fără amorsarea arcului electric. Varianta din Fig.7.38a are următorul mod de funcționare: la închiderea contactului principal al aparatului de comutație se asigură, prin comanda tiristorului T_3, încărcarea condensatorului cu o tensiune având polaritatea indicată în figură, pregătindu-se astfel deconectarea cu comutație hibridă a circuitului. La deschiderea contactului principal al contactorului, deconectarea hibridă presupune succesiv trecerea în conducție a tiristorului de șuntare T_1, urmată de blocarea acestuia după evitarea formării arcului electric între piesele de contact, prin activarea circuitului de stingere la trecerea în conducție a tiristorului T_3; dioda semiconductoare și eventual rezistorul care șuntează contactul principal al aparatului de comutație au același rol ca în Fig.7.37c.

Schema dată în Fig.7.38b este similară din punct de vedere al funcționării dar este reversibilă. O problemă importantă în realizarea contactoarelor de curent continuu cu comutație hibridă o reprezintă schemele de comandă. Cerințele de bază ce trebuiesc impuse pentru asemenea scheme sunt:

-conectarea tiristoarelor în paralel cu contactele principale ale contactorului în timp cât mai scurt după desprinderea pieselor de contact, atât la deconectare cât și la vibrația acestora;

-conectarea schemei suplimentare pentru comanda tiristoarelor cu o întârziere corespunzătoare unei distanţe de (1-2) mm între piesele de contact, pentru a evita riscul străpungerii secundare sub acţiunea tensiunii tranzitorii de restabilire.

-blocarea circuitului de comandă a preluării conducţiei dacă condensatorul care intervine în schemă nu este complet încărcat.

-protecţia împotriva trecerii în conducţie a tiristoarelor de şuntare pentru situaţiile în care este de preferat să se accepte deconectarea cu arc electric a contactorului sau să nu se deconecteze.

-stabilitate la supratensiunile ce apar la deconectarea circuitelor inductive.

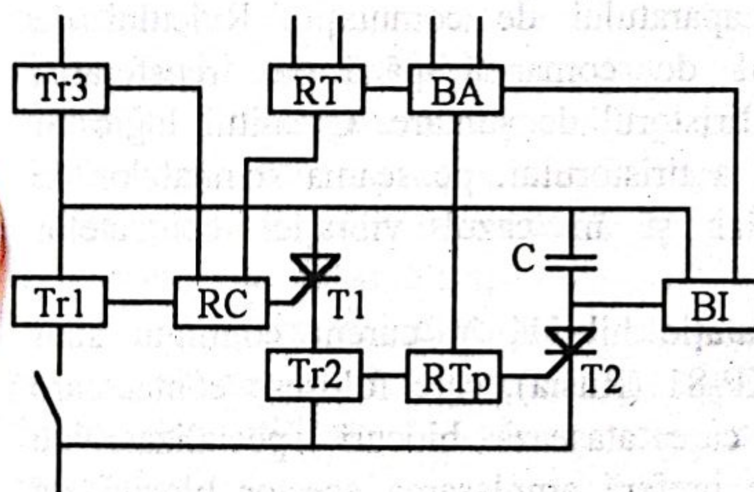


Fig.7.39
Schema principială de comandă

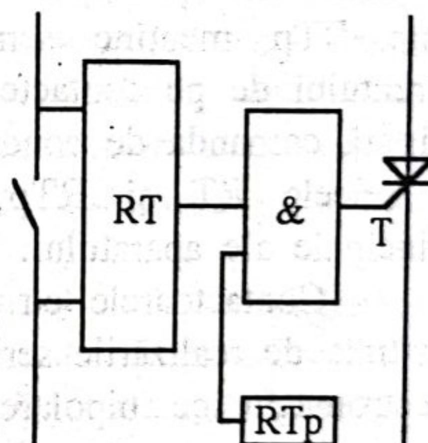


Fig.7.40
Schemă de comandă la valori reduse ale curentului

Schema principială de comandă a tiristoarelor din componenţa contactoarelor hibride de curent continuu este prezentată în Fig.7.39 şi cuprinde traductoarele de curent Tr_1, Tr_2, Tr_3, releul de curent RC, releul de tensiune RT, releul de timp RTp, blocul de încărcare a condensatorului BI, blocul de alimentare BA. Traductorul de curent Tr_1, prin intermediul releului de curent RC, asigură comanda de trecere în conducţie a tiristorului de şuntare T_1 în domeniul normal al valorilor curentului din circuit. Traductorul de curent Tr_2, după o întârziere prescrisă prin reglarea releului de timp RTp prin care se asigură depărtarea suficientă a pieselor de

contact, comandă trecerea în conducție a tiristorului T_2 și deci activarea circuitului de stingere al tiristorului T_1. Traductorul de curent Tr_3 asigură blocarea comenzii de comutație fără arc electric la curenți având valori peste cea nominală.

Releul de tensiune RT realizează blocarea funcționării schemei în cazul unor fluctuații nedorite ale tensiunii furnizate de blocul de alimentare BA. O asemenea schemă de comandă pune probleme mai ales la funcționarea pentru valori mici ale curentului din circuit, sub I_n, care trebuie să depășească valorile de prag impuse de traductoarele de curent Tr_1 și Tr_2.

O soluție reușită, capabilă să realizeze comutația hibridă în curent continuu la valori reduse ale curentului din circuit este indicată în Fig.7.40, releul de tensiune RT fiind conectat în paralel pe contactele principale ale aparatului de comutație. Releului de timp RTp menține semnalul de comandă până la trensferarea curentului de pe contacte pe tiristorul de șuntare. Circuitul logic ȘI asigură comanda de conducție a tiristorului, pe seama semnalelor de la releele RT și RTp, chiar și în cazul vibrației contactelor principale ale aparatului.

Contactoarele cu comutație hibridă în curent continuu sunt ilustrate de realizările seriei KP-81 (Rusia), care folosesc contactoare electromagnetice bipolare la care atașează blocuri specializate de comandă. De menționat că se preferă amplasarea acestor blocuri de comandă la o distanță de pâna la 1,5 m de contactor.Ansamblurile astfel obținute asigură comutația fără arc electric a sarcinilor de curent continuu pentru curenți de până la $2{,}5I_n$ și pentru constante de timp ale circuitului de circa 10 ms.

Valoarea minimă a curentului care poate fi deconectat fără arc electric este de circa $0{,}15I_n$, funcționarea extinzându-se chiar până la valori de $10I_n$, pentru $1{,}1U_n$ și constantă de timp de 10 ms. Rezistența la uzura electrică în condiții normale de comutație este sub 5 milioane de manevre la frecvență de conectare sub 2000 cicluri/oră, pentru rezistență mecanică la uzură corespunzătoare la 10 milioane de manevre. Alte detalii cu privire la construcția și performanțele acestei serii de contactoare hibride de curent continuu pot fi urmărite în Tab.7.8.

Tab.7.8

Tipul de aparat	I_n [A]	U_n [V]	Lungime [mm]	Inălţime [mm]	Lăţime [mm]	Masă aparat [Kg]	Masă bloc [Kg]
KP 81-33	160	220	390	473	256	29	20
KP 81-35	250	220	480	555	303	41,5	20
KP 81-37	400	220	503	480	435	60	28
KP 81-39	630	220	565	580	465	90	34

Cercetările şi realizările tehnicii actuale în domeniul contactoarelor hibride conturează următoarele perspective pentru dezvoltarea în acest domeniu:

-posibilitatea de a micşora cu (30...40)% masa şi gabaritul acestora prin diminuarea cursei contactelor mobile şi a distanţei dintre polii aparatului, renunţarea la rezervare în construcţia camerelor de stingere şi forţarea regimului tranzitoriu la funcţionarea electromagneţilor de acţionare; folosirea fără radiator a tiristoarelor în asemenea scheme favorizează de asemenea reducerea gabaritului unor asemenea ansambluri;

-ameliorarea indicatorilor tehnico-constructivi tip masă/gabarit, prin evaluarea mai riguroasă a capacităţii de supraîncărcare a tiristoarelor utilizate în scheme ce realizează comutaţia hibridă a circuitelor;

-folosirea contactelor compensate la acţiunea forţelor electrodinamice, cu efecte favorabile în creşterea fiabilităţii ansamblului, permiţând în acelaşi timp conservarea performanţelor chiar la scăderea valorilor curentului nominal al tiristoarelor de şuntare;

-limitarea disproporţiei dintre rezistenţa la uzură mecanică şi rezistenţa la uzură electrică, pe seama ameliorării construcţiei contactelor ca formă şi ca material;

-extinderea folosirii contactoarelor cu comutaţie hibridă în industria metalurgică sau în medii corozive, unde acestea se dovedesc mai potrivite chiar decât aparatele cu comutaţie în vid.

Dezvoltarea ulterioară a comutaţiei hibride este condiţionată desigur de progresele tehnologice în domeniul realizării

semiconductoarelor comandate de putere pentru preluarea conducției, care prezintă interes atât din punct de vedere al performanțelor cât

7.2.5. Contactoare cu comutație statică

Comutația statică s-a impus pentru utilizări industriale curente, atât ca efect al progreselor realizate în domeniul semiconductoarelor (mereu mai performante, mai ieftine și cu posibilități comode de comandă), cât și datorită calităților deosebite ale unor asemenea ansambluri la funcționarea în regim dinamic. Realizările actuale preferă folosirea semiconductoarelor comandate de tip tiristor sau triac însă există numeroase soluții care au utilizat tranzistoare de putere de exemplu.

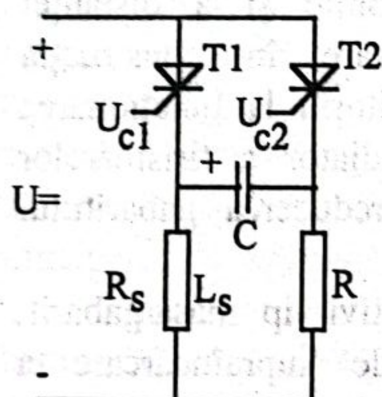


Fig.7.41
Contactor static de c.c.

Schema de principiu a unui contactor static de curent continuu este prezentată în Fig.7.41. Contactorul conține tiristorul T_1 care, la o comandă convenabilă asigurată de tensiunea U_{c1}, continuă sau sub formă de impuls, trece în stare de conducție și asigură alimentarea consumatorului R_s, L_s. In timpul procesului tranzitoriu de conectare se realizează și încărcarea condensatorului C pe traseul T_1-C-R, cu o tensiune având polaritatea indicată în Fig.5.1. Pentru a realiza deconectarea contactorului se comandă trecerea în conducție a tiristorului T_2; se asigură astfel activarea circuitului de stingere, ce intervine prin descărcarea condensatorului C cu un curent direct pentru T_2, respectiv cu un curent invers pentru T_1, pe traseul C-T_1-T_2. Dacă valoarea rezultantă a curentului prin T_1, ca diferență dintre curentul nominal ce parcurge consumatorul (R_s, L_s) și curentul de descărcare al condensatorului C, este sub limita minimă de conducție, se obține stingerea acestui tiristor și deci întreruperea circuitului.

De menționat faptul că stingerea tiristorului auxiliar T_2 se realizează dacă valorile rezistenței R sunt suficient de mari; aceasta are efecte nefavorabile asupra frecvenței de conectare a contactorului

a cărui funcționare presupune condensatorul C încărcat, datorită creșterii valorilor constantei de timp RC. Preocupările pentru realizarea contactoarelor statice de curent continuu au fost dominate de ideea scăderii valorii capacității condensatorului C, care se reflectă hotărâtor atât în gabaritul cât și în prețul de cost al ansamblului. In acest scop s-a preferat folosirea descărcării rezonante a condensatorului, adăugând în serie cu acesta o inductanță convenabil calibrată. S-a urmărit de asemenea posibilitatea micșorării valorii curentului nominal al tiristorului auxiliar T_2, prin controlarea riguroasă a timpului său de conducție, știut fiind faptul că tiristoarele suportă supracurenți mari pentru durate suficient de mici, sub 10 ms. Protecția la supratensiuni a tiristoarelor schemei, ca și la amorsarea falsă pentru viteze prea mari de creștere a tensiunii, se realizează cu ajutorul unor circuite R-C conectate în paralel. Protecția împotriva amorsării tiristoarelor datorită vitezelor mari de variație a curentului din circuit se obține prin amplasarea în serie a unei inductanțe de valoare convenabilă, dacă inductanța L_s a consumatorului nu este suficient de mare. Pentru separarea galvanică a consumatorului față de sursa de alimentare în situația deconectat se poate apela la un pol separator exterior. Incălzirea excesivă a tiristorului T_1 datorită pierderilor de putere în regim normal de funcționare este evitată prin folosirea radiatoarelor.

Una dintre cele mai importante probleme legate de realizarea contactoarelor cu comutație statică este aceea a asigurării semnalelor de comandă U_{c1} și U_{c2}. Acestea pot fi de tipul tensiune continuă sau sub formă de impulsuri, a doua soluție fiind mai convenabilă atât prin trecerea fermă în conducție a tiristoarelor cât și datorită consumului mai redus de putere în circuitul de comandă. Cum de obicei sursa de alimentare a circuitului asigură și semnalele necesare de comandă, apare necesitatea de a realiza separarea galvanică dintre circuitul de forță și circuitul de comandă al contactorului static. Acest lucru se obține fie prin utilizarea unor transformatoare de separare la ieșirea formatorului de impulsuri, fie prin utilizarea comenzilor optice ce folosesc optocuploare, fibre optice etc. Atunci când pe lângă înfășurările primară (N_1) respectiv secundară (N_2), transformatorul de separare are și o înfășurare de premagnetizare

(N_p), aşa cum se observă în Fig.7.42, este posibilă în plus o prelucrare logică a impulsurilor de comandă.

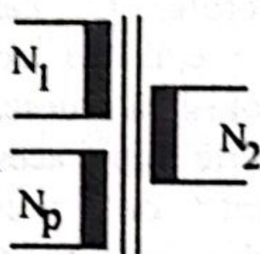


Fig.7.42
Transformator cu premagnetizare

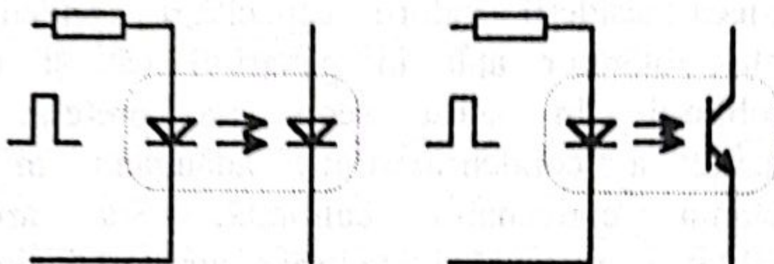


Fig.7.43
Optocuploare pentru comanda tiristoarelor

Soluţiile actuale preferă comanda optică a tiristoarelor din schemele de contactoare statice, realizată cu optocuploare cu sau fără fibre optice. Optocuplorul este un ansamblu diodă luminiscentă-fototranzistor sau diodă luminiscentă-fototiristor, care converteşte impulsurile de comandă aplicate pe dioda luminiscentă în semnale

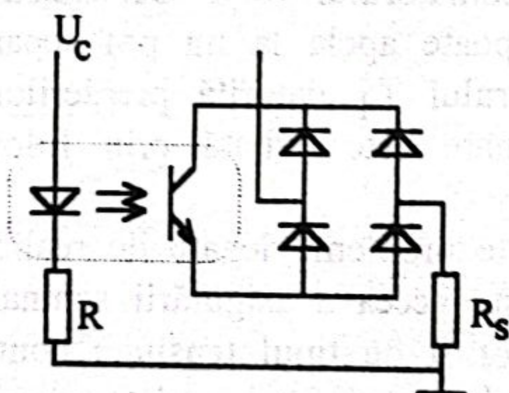


Fig.7.44
Contactor static cu fototranzistor

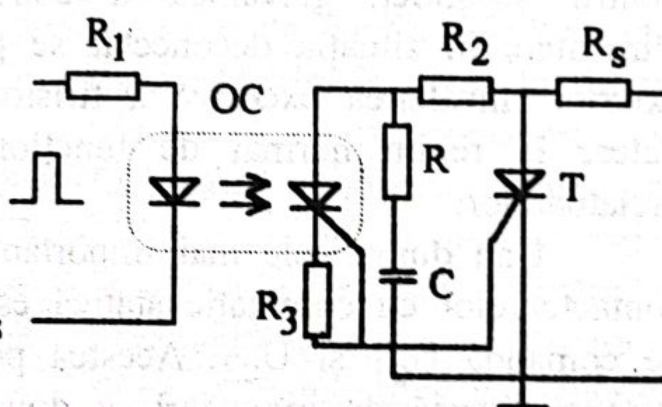


Fig.7.45
Contactor static cu fototiristor

luminoase. Acestea sunt capabile să asigure trecerea în conducţie a fototranzistorului respectiv a tiristorului aferent, cu care este asamblat de obicei într-o aceeaşi capsulă, Fig.7.43.

In Fig.7.44 este prezentată o variantă de contactor static de curent nominal limitat de fototranzistorul din schemă, la valori de ordinul sute de miliamperi, care utilizează diode semiconductoare în locul obişnuitelor tiristoare. Schema de principiu care asigură

comanda de conectare pentru un contactor static de curent continuu folosind un fototiristor este dată în Fig.7.45. Limitarea curentului prin fototiristor se obţine pe seama ansamblului rezistenţelor R_s şi R_2. Circuitul RC asigură protecţia la supratensiuni.

Atunci când se preconizează realizarea unui contactor static având curentul nominal mai mare decât acela al tiristoarelor se poate apela la conectarea în paralel a acestora. Dacă tensiunea nominală a unui tiristor este mai mică decât tensiunea nominală a contactorului static se acceptă conectarea în seria a mai multe tiristoare, cu măsuri speciale de uniformizare a distribuţiei tensiunii pe elementele serie. In ambele situaţii trecerea simultană în conducţie a tiristoarelor utilizate este esenţială pentru buna comportare a ansamblului. In acest scop se impune transmiterea comenzii de trecere în conducţie a tiristoarelor schemei prin fibre optice, aşa cum se poate urmări în Fig.7.46. Rezistenţele de mare valoare plasate în paralel cu tiristoarele asigură tocmai uniformizarea distribuţiei tensiunii pe elementele serie.

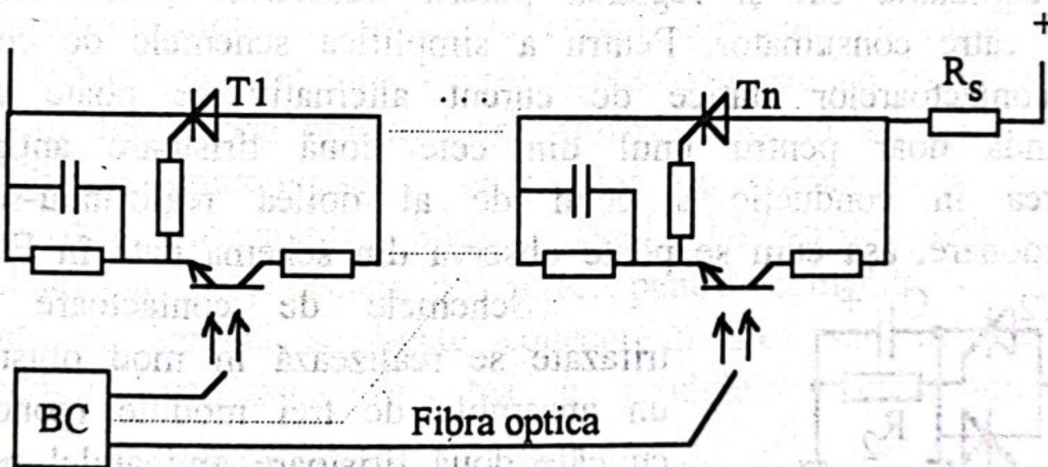


Fig.7.46
Comanda simultană a unui contactor de înaltă tensiune folosind fibre optice

Se poate afirma deci în final că pentru funcţionarea contactoarelor statice de curent continuu este mai dificil de realizat deconectarea, care presupune utilizarea unui circuit specializat de stingere, ceea ce practic dublează schema ansamblului. Abilitatea în asigurarea deconectării contactorului conduce la soluţii mai ieftine şi cu bune performanţe.

Scheme de principiu ale unor contactoare statice monofazate de curent alternativ sunt prezentate în Fig.7.47. Se constată că cele două tiristoare antiparalel ale primei variante pot fi înlocuite cu un triac, dar există şi posibilitatea de a folosi un singur tiristor în diagonala unei punţi redresoare cu diode.

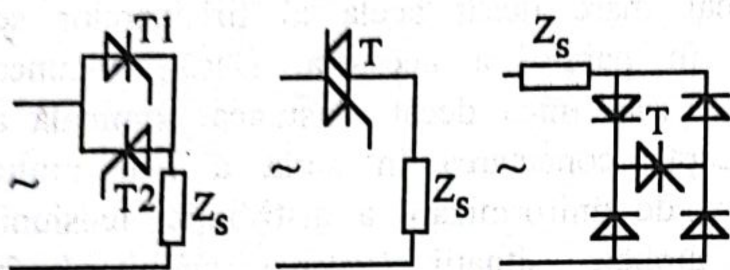


Fig.7.47

Scheme de contactoare statice de c.a.

Principala problemă cu privire la funcţionarea unor asemenea ansambluri este repetarea semnalului de comandă pe poarta tiristoarelor pentru fiecare semiperioadă de conducţie. Semnalul de comandă poate fi desigur o tensiune continuă însă soluţia care s-a impus este comanda cu impulsuri, mai sigură şi mai economică. In plus aceasta permite şi reglarea comodă a fazei impulsurilor de comandă, ceea ce asigură atât comutaţia cât şi reglarea puterii transferate prin contactorul static către consumator. Pentru a simplifica schemele de comandă ale contactoarelor statice de curent alternativ se poate accepta comanda doar pentru unul din cele două tiristoare antiparalel, trecerea în conducţie a celui de al doilea realizându-se prin subordonare, aşa cum se poate observa din schema dată în Fig.7.48.

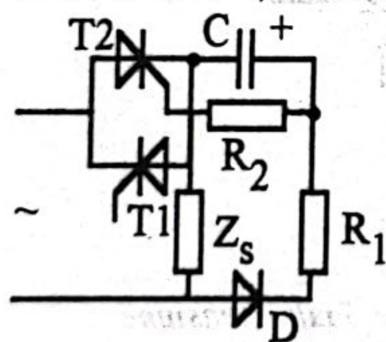


Fig.7.48

Comandă prin subordonare

Schemele de contactoare statice trifazate se realizează în mod obişnuit ca un ansamblu de trei module monofazate, cu câte două tiristoare antiparalel pe fază, Fig.7.49a, impedanţa de sarcină Z_s putând fi conectată în stea sau în triunghi. Considerente legate de preţul de cost al unui asemenea contactor static, dar şi simplificarea circuitelor de comandă, au impus în ultimul timp folosirea unor module tiristor-diodă antiparalel, livrate ca atare de firmele producătoare de elemente semiconductoare de putere. Funcţionarea unui asemenea contactor static trifazat decurge similar, Fig.7.49b, însă presupune comanda a doar trei tiristoare, eventual chiar cu

impulsuri de fază reglabilă. Pentru anumite aplicaţii s-au realizat şi scheme speciale de contactoare statice trifazate ce utilizează doar trei tiristoare, care prin trecerea în conducţie asigură conectarea pe conductorul neutru a sistemului trifazat de tensiuni.

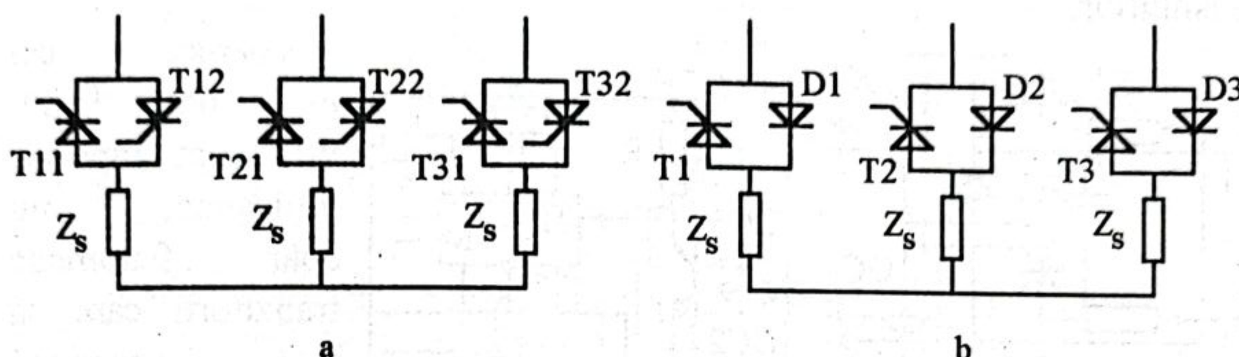


Fig.7.49
Scheme de contactoare statice trifazate

Problema separării galvanice a circuitului de comandă faţă de circuitul de forţă la funcţionarea contactoarelor statice de curent alternativ se rezolvă folosind soluţii similare cu cele anunţate mai sus pentru contactoarele statice de curent continuu. In Fig.7.50 se prezintă scheme de comandă pentru contactoare statice trifazate care folosesc în acest scop optocuploare, ilustrându-se în acelaşi timp şi posibilităţi de sincronizare a semnalelor de comandă cu reţeaua trifazată de alimentare. Atunci când LED-urile celor trei optocuploare ar fi conectate în serie, pentru comanda simultană, impedanţa de sarcină se poate conecta în stea sau în triunghi, preferându-se conectarea în stea a modulelor semiconductoare monofazate de putere pentru a diminua de $\sqrt{3}$ ori a tensiunii suportate de tiristoarele (triacurile) din schemă. Semnalele de sincronizare cu reţeaua trifazată pot fi generate conectând LED-urile celor trei optocuploare între cele trei faze, în stea sau în triunghi, aşa cum se poate observa în Fig.7.50 unde LED-urile sunt amplasate în diagonala unei punţi cu diode pentru a fi alimentate în ambele alternanţe. Când tensiunea între două faze scade sub 10 V, LED-ul respectiv se stinge, fototranzistorul se blochează, Fig.5.10, rezultând semnal logic 1 la intrarea B a unuia dintre cele două CBM cuprinse în circuitul integrat. Ieşirea P generează câte un impuls la fiecare anulare a tensiunii U_{R-S}, identificând această

tensiune. Ieşirea Z generează impulsuri la anularea oricăreia din cele trei tensiuni dintre fazele reţelei, deci cu frecvenţa de 300 Hz. Se poate regla temporizarea produsă de cele două CBM astfel încât frontul descrescător al impulsurilor să coincidă exact cu anularea tensiunilor.

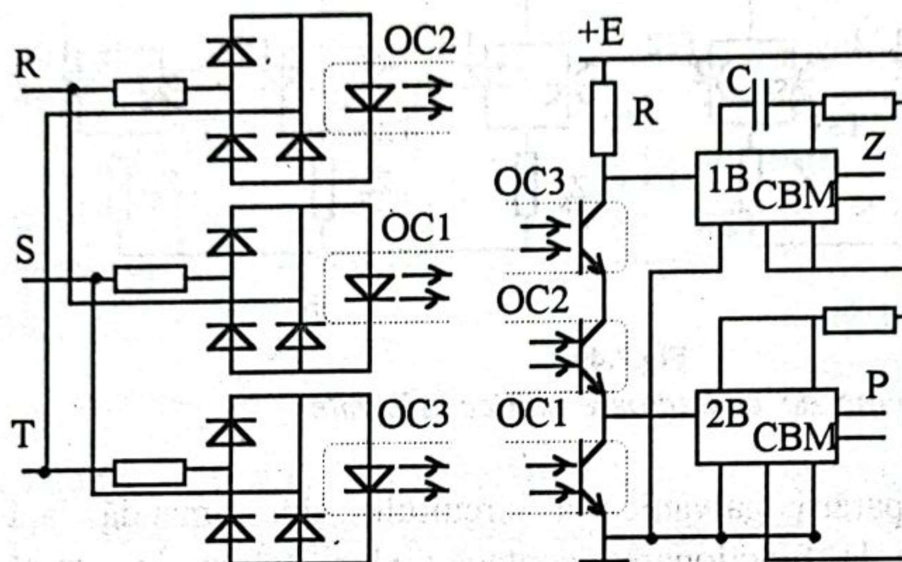


Fig.7.50
Contactor static trifazat

Deoarece cel puţin două LED-uri sunt aprinse totdeauna, nu apar fenomene tranzitorii care să facă necesară folosirea unui filtru trece-jos. Inerţia de câteva microsecunde a fototranzistoarelor contribuie şi ea la lipsa fenomenelor tranzitorii şi la sensibilitatea redusă a circuitului faţă de perturbaţii [26].

Comanda tiristoarelor sau a triacurilor unor scheme de

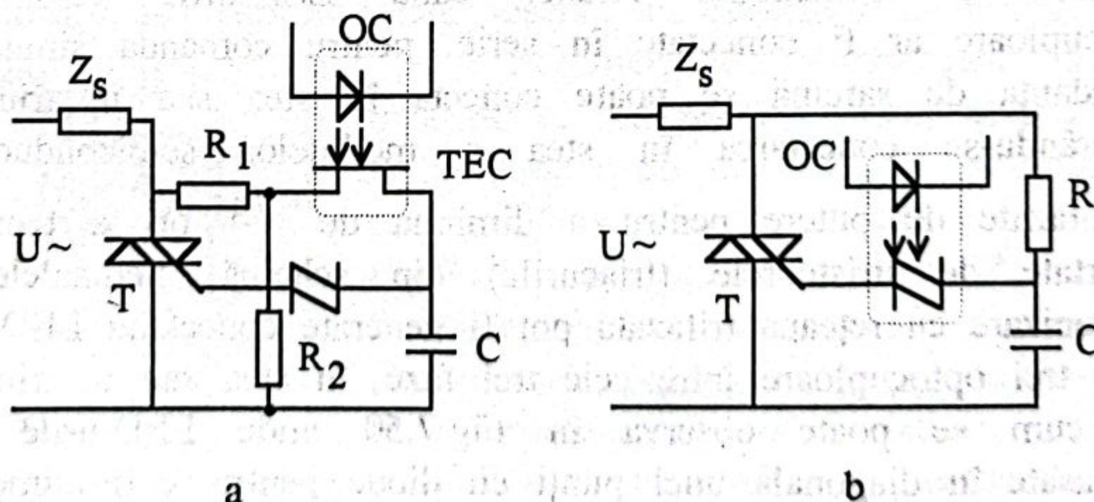


Fig.7.51
Scheme de comandă a triacurilor

contactoare statice de curent alternativ cu controlul fazei se poate realiza cu un optocuplor cu TEC, aşa cum se poate urmări în

Fig.7.51a, sau cu optocuplor cu fotocontactor bilateral pentru care incidenţa luminoasă reglează pragul de deschidere a acestuia, Fig.7.51b.

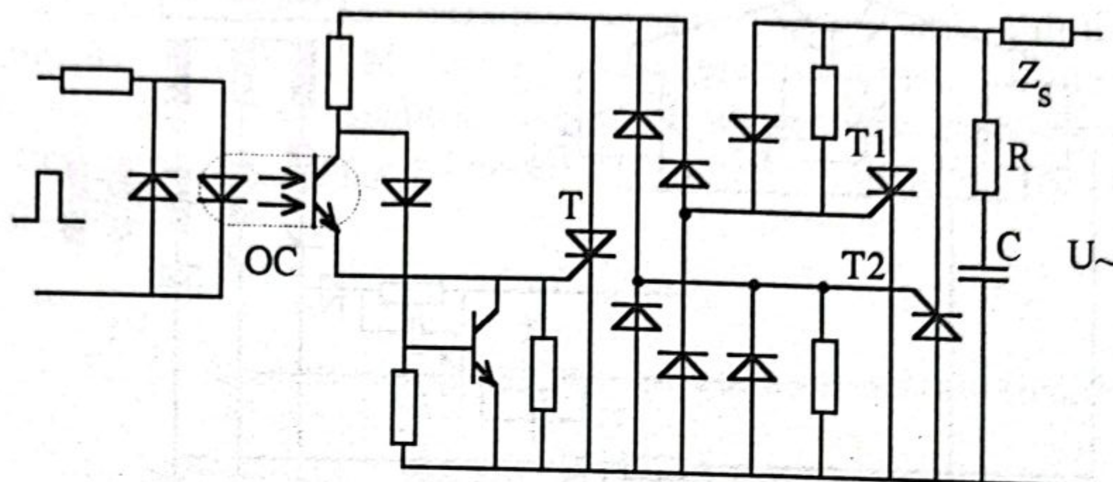


Fig.7.52

Contactor static monofazat cu separare galvanică

O soluţie de separare galvanică între circuitul de comandă şi cel de forţă pentru un contactor static monofazat ce foloseşte optocuplor şi tiristor auxiliar de mică putere este prezentată în Fig.7.52.

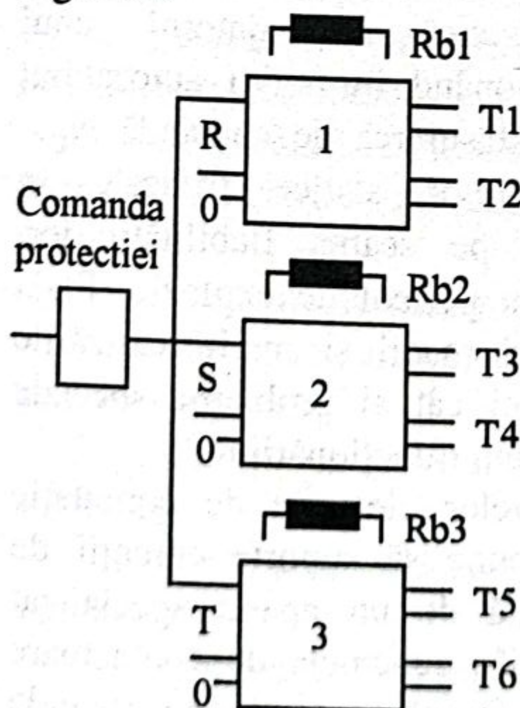


Fig.7.53

O confirmare a preocupărilor actuale cu privire la realizarea unor contactoare statice trifazate cu performanţe deosebite o reprezintă şi soluţia semnalată în [30]. Schema de principiu a unui contactor static trifazat cu posibilităţi de programare a fazei de conectare şi a timpului de deschidere este prezentată în Fig.7.53. O asemenea realizare permite pe de o parte studiul regimurilor tranzitorii pentru diferite tipuri de receptoare electrice, dar anunţă de asemenea posibilitatea utilizării unei protecţii electronice eficiente la supracurenţi ce asigură şi creşterea fiabilităţii aparatului de comutaţie.

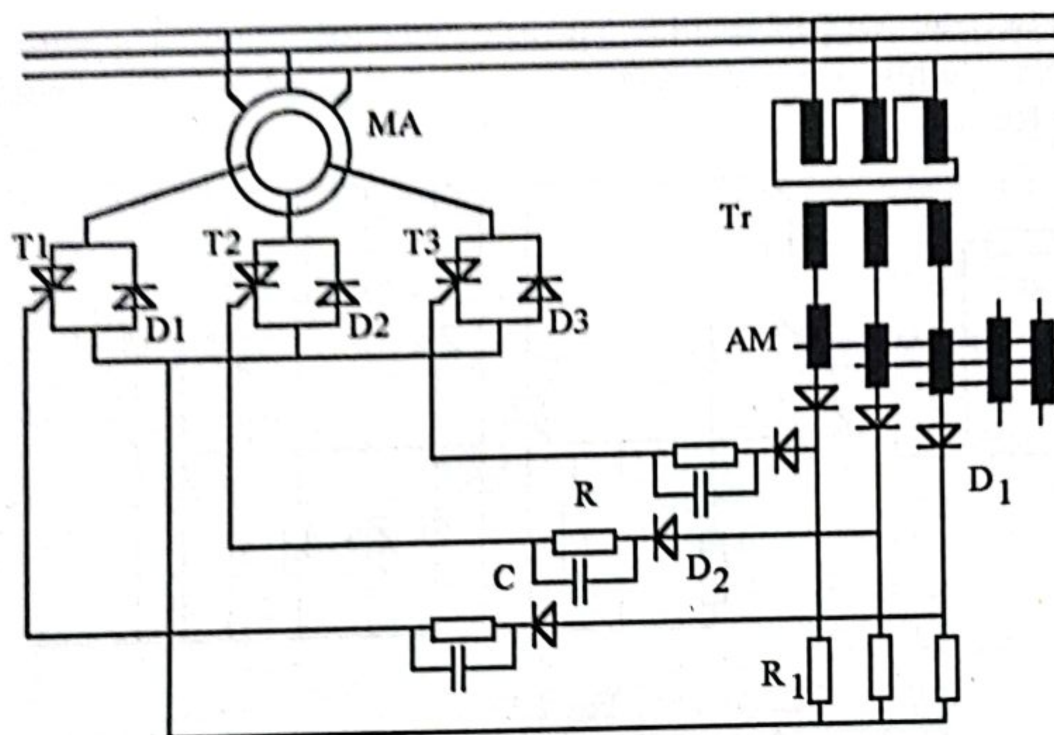


Fig.7.54
Comanda motorului asincron cu contactor static

Un exemplu de utilizare a unui contactor static trifazat pentru alimentarea unui motor asincron este ilustrat în Fig.7.54, unde comanda tiristoarelor se realizează cu ajutorul unui amplificator magnetic trifazat AM, funcţionând în regim autosaturat prin modificarea curentului ce parcurge înfăşurarea de comandă N_C.

Evoluţia în domeniul contactoarelor statice trifazate în ultimii 10 ani se explică în principal pe seama fiabilităţii lor, acestea fiind desigur preferate în medii cu pericol de explozie. Plaja de utilizare se referă în prezent la puteri medii şi mari, realizările actuale rezolvând atât problema comutaţiei cât şi probleme speciale de control pentru anumite mărimi în timpul funcţionării.

Trebuie subliniat faptul că aparatelor electrice de comutaţie cu funcţionalitate de contactor li se impune să suporte curenţii de scurtcircuit până la deconectarea asigurată de un aparat specializat de tip întrerupător; aceasta înseamnă că, în schemele de contactoare statice prezentate anterior, se subînţelege faptul că semiconductoarele comandate de tip tiristor sau triac trebuie să suporte valorile mari ale curenţilor de defect, desigur prin acceptarea supradimensionării acestora, fiind recunoscută capacitatea lor scăzută de a suporta

supracurenţi. Cumulând funcţia de comutaţie cu funcţia de reglare a puterii transferate prin contactor către consumator, contactoarele statice de curent alternativ au pătruns mai uşor în instalaţiile industriale. Perspectiva unanim acceptată este însă substituirea comutaţiei naturale a tiristoarelor cu comutaţia forţată, astfel încât prin adăugarea unor elemente de protecţie adecvate şi eficiente să se treacă de la funcţionalitatea de contactor static la aceea de întrerupător static.

7.2.6. Aparate de comutaţie cu contacte metalo-lichide

In ultimele două decenii a crescut interesul pentru realizarea comutaţiei cu contacte metalo-lichide. In asemenea dispozitive comutaţia are la bază metale sau aliaje care se găsesc în fază lichidă. Pentru siguranţele fuzibile activ este chiar elementul fuzibil; în întrerupătoare şi în alte aparate electrice este activă zona contactelor metalo-lichide de comutaţie. In condiţii normale elementul activ poate fi în stare solidă, lichidă sau intermediară. In unele cazuri funcţia de element activ o are materialul feromagnetic ce se găseşte într-un dielectric lichid, comanda pentru conectare-deconectare asigurându-se prin acţiunea câmpului magnetic.

Utilizarea contactelor metalo-lichide pentru realizarea aparatelor electrice de comutaţie prezintă avantaje, între care se amintesc:

-lipsa uzurii mecanice şi electrice a elementului activ;

-eliminarea necesităţii de a folosi metale preţioase depuse pe piesele decontact;

-eliminarea resorturilor pentru asigurarea forţei de apăsare pe contacte;

-eliminarea vibraţiei contactelor şi deci a efectelor nedorite ale acesteia;

-eliminarea fenomenelor de degradare a contactelor datorită fenomenelor de oxidare.

Ca dezavantaje pentru aparatele electrice de comutaţie cu contacte metalo-lichide se semnalează:

-poziţie de funcţionare impusă;

-respectarea strictă a unor restricţii cu privire la regimul termic al componentelor active în timpul funcţionării;

-necesitatea utilizării unor construcţii etanşe;

-alegerea dificilă a materialelor pentru contacte.

Principalele materiale utilizate pentru realizarea unor aparate de comutaţie cu contacte metalo-lichide sunt sodiul, potasiul, mercurul sau aliaje sodiu-potasiu (cuprinzând 40...90% potasiu) eventual, cu proprietăţi similare, aliaje galiu (60%), indiu (25%) şi staniu (13%). Principalele lor caracteristici sunt indicate în Tab.7.9.

Tab.7.9

	Sodiu	Potasiu	Mercur
Densitate, [Kg/m^3]	968	862	13520
Temp. topire, [^{o}C]	98	63,5	-38,9
Temp. vaporizare, [^{o}C]	883	760	357
Căld. specif., [J/Kg ^{o}C]	1230	741,2	0,139
Coef. de dilatare, [^{o}C^{-1}]	7,1 10^{-5}	8,33 10^{-5}	18,26 10^{-5}
Rezistivitate, [Ωm]	4,3.10^{-8}	7,12.10^{-8}	94.10^{-8}

Faptul că metalele de tip sodiu sau potasiu sunt foarte active din punct de vedere chimic impune măsuri de protecţie pentru utilizarea lor la realizarea contactelor unor aparate electrice de comutaţie, ştiut fiind că acestea se păstrează imersate în ulei sau în petrol.

Este de asemenea recunoscută proprietatea mercurului de a forma amalgame împreună cu anumite metale, ceea ce impune alegerea convenabilă a metalelor pentru contactele unor asemenea aparate de comutaţie. Fiind activ din punct de vedere chimic mercurul formează cu uşurinţă oxizi (Hg_2O sau HgO), ozonul la temperaturi de 300...350 ^{o}C, stimulând asemenea reacţii. Un argument important însă pentru utilizarea mercurului la realizarea aparatelor moderne de comutaţie cu contacte metalo-lichide îl reprezintă faptul că rezistivitatea acestuia creşte de 10^5...10^6 ori la presiunea critică de 150 MPa şi la temperatura de 1753^{o}C, mercurul în stare de vapori devenind un veritabil limitator de curent. Observaţii similare sunt valabile şi pentru sodiu sau potasiu, caracterizate prin valori mult mai mari ale rezistivităţii electrice în

stare de valori decât în stare solidă sau lichidă, când valorile rezistivităţilor sunt comparabile.

Studiile cu privire la realizarea unor aparate de comutaţie cu contacte metalo-lichide fac obiectul preocupărilor unor firme de renume din Anglia, Germania, Franţa, SUA sau Japonia; descrierea funcţionării unor asemenea ansambluri este foarte dificilă datorită multitudinii fenomenelor şi a factorilor de influenţă, făcând apel atât la ecuaţii specifice fluidelor (ecuaţia de mişcare Navier-Stocks respectiv ecuaţia de continuitate) cât şi, firesc, la o ecuaţie de bilanţ energetic [23].

Principiul de funcţionare a unor asemenea aparate de comutaţie cu contacte metalolichide constă în aceea că închiderea şi deschiderea contactelor, realizate cu electrozi metalici (solizi), se obţine prin acţiunea unui mediu metalic lichid. Pentru a realiza comutaţia electrică se apelează fie la mişcarea electrozilor metalici solizi, fie la modificarea nivelului metalului lichid, folosind în acest scop dispozitive electromagnetice, electrodinamice, hidraulice, de inducţie, pneumatice etc. Chiar dacă producerea industrială a unor asemenea aparate electrice de comutaţie nu este deplin pusă la punct, cercetările efectuate, avantajele şi performanţele obţinute deja anunţă bune perspective pentru implementarea acestora în instalaţiile electrice.

O primă variantă de realizare a unui asemenea aparat de comutaţie cu contacte metalo-lichide, prezentată în Fig.7.55, cuprinde: contactele fixe reprezentate de electrozii metalici 1 şi 2, între care se plasează adaosul din plastic, 3, prevăzut cu orificiile capilare 4; în interiorul spaţiului dintre contacte se găsesc pistonul 8, metalul lichid 9 şi mediul lichid interior 6, la o presiune fixată prin pistonul 7; ansamblul piston 7, piston 8 şi bobina de suflaj magnetic (care nu apare pe desen), sunt amplasate în interiorul corpului 5.

Funcţionarea acestui aparat de comutaţie decurge astfel: la conectare pistonul 8 se găseşte în poziţia limită inferioară, astfel încât metalul lichid 9 asigură legătura electrică între electrozii 1 şi 2; mediul lichid inert 6, aflat sub acţiunea forţei transmise de pistonul 7, împiedică intrarea metalului lichid 9 în interstiţiile capilare 4. Pentru manevra de deconectare se acţionează pistonul 8

spre partea superioară, astfel încât nivelul metalului lichid scade sub acţiunea gravitaţiei şi întrerupe legătura dintre contactele fixe 1 şi 2; totodată se aplică pe pistonul 7 o forţă ce permite revenirea mediului lichid inert 6, prin interstiţiile 4 şi participarea lui la asigurarea izolaţiei interne, împreună cu adaosul din plastic, 3. Arcul electric de comutaţie care apare în canalul izolant dintre pistonul 8 şi piesa 3, sub acţiunea suflajului magnetic, este împins către exterior şi răcit, favorizându-se deci stingerea sa. Procesul de stingere a arcului electric de comutaţie are loc practic în mediul lichid inert 6, ameliorând astfel şi comportarea termică a ansamblului în exploatare. In plus, final, mediul lichid inert 6 ajunge chiar să sporească nivelul de izolaţie dintre piesele fixe de contact 1 şi 2.

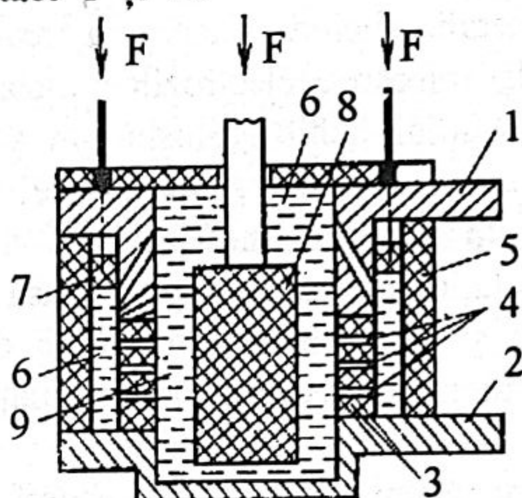


Fig.7.55

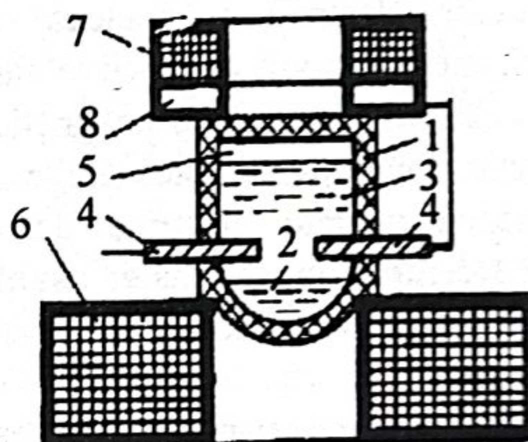


Fig.7.56

Aparate cu comutaţie metalo-lichidă

O variantă de aparat electric cu contacte metalo-lichide având performanţe de comutaţie comparabile cu cele realizate folosind comutaţia statică [23], este prezentată în Fig.7.56 şi are următoarele părţi componente: corpul 1 din material electroizolant, umplut parţial cu metal lichid 2 (eutectic galiu-indiu-staniu) şi parţial cu lichid de stingere electroizolant 3 (ulei de transformator), care având densitatea mai mică se separă deasupra metalului lichid; puţin peste nivelul metalului lichid se amplasează electrozii metalici 4 ce reprezintă contactele fixe ale aparatului; restul volumului camerei de stingere e umplut cu gaz inert 5; dispozitivul de acţionare este realizat sub forma bobinelor de curent alternativ 6 şi

7, conectate adițional. Pe corpul electroizolant 1 este amplasată și bobina 8 conectată în serie cu piesele de contact 4. Funcționarea acestui aparat de comutație cu contacte metalo-lichide la conectare decurge astfel: pentru a asigura legătura electrică între piesele fixe de contact 4, se alimentează bobinele 6 și 7, astfel încât curenții induși în masa de metal lichid 2 realizează interacțiuni de tip forță electrodinamică ce împreună cu forțele datorate tensiunii superficiale a metalului lichid provoacă urcarea metalului lichid pe pereții incintei electroizolante 1, imersând desigur piesele de contact 4; deplasarea orizontală a metalului lichid este limitată prin acțiunea bobinei superioare de curent 8, ce formează o groapă de potențial. Pentru deconectarea aparatului de comutație se întrerupe alimentarea bobinelor 6 și 7, astfel încât sub acțiunea greutății proprii metalul lichid 2 revine la partea inferioară a corpului electroizolant 1; arcul electric de comutațiece se amorsează între electrozii 4 și metalul lichid 2 se stinge prin acțiunea lichidului electroizolant 3. La apariția unor curenți de scurtcircuit, forța electromagnetică datorată bobinei 8 și orientată în sensul forței de greutate grăbește deschiderea circuitului între metalul lichid 2 și electrozii 4, deci ansamblul poate fi extins și pentru funcționalitate de întrerupător. Principalul dezavantaj al unei asemenea soluții îl constituie complexitatea construcției aparatului.

Trebuie menționat faptul că utilizarea comutației cu contacte metalo-lichide a stat la baza realizării unor siguranțe fuzibile cu fază lichidă, ale căror performanțe le impun pentru protecția semiconductoarelor de putere. Principalul avantaj al unor asemenea elemente de protecție îl constituie faptul că se asigură funcționarea lor repetată, fără a mai fi necesară înlocuirea elementului fuzibil după o deconectare reușită. In plus valorile foarte mari ale rezistivității metalelor în stare de vapori asigură un efect de limitare a curentului de defect, foarte important pentru protecția elementelor semiconductoare.

In principiu o asemenea siguranță fuzibilă cu autorefacere de tip NFU, propusă de firma Mitsubischi, așa cum se poate urmări în Fig.7.57, cuprinde: electrozii metalici 1 și 2, între care se asigură legătura electrică printr-un element fuzibil convenabil calibrat realizat din sodiu, 3; pentru unele variante acest element fuzibil are

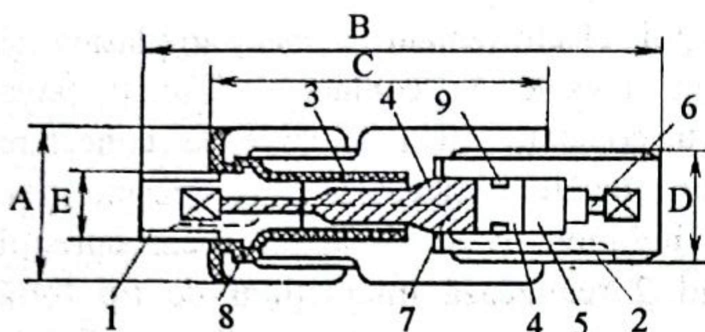


Fig.7.57
Siguranță fuzibilă metalo-lichidă

secţiune variabilă, cu diametrul modificându-se de la 3,5 mm la 1,3 mm pe o lungime de 5 mm, în timp ce pentru alte realizări acest diametru rămâne constant, de 2,8 mm pe o lungime de 17 mm. In regim normal curentul din circuitul de protejat parcurge traseul indicat pe desen cu linie întreruptă, de la electrodul 1, prin elementul fuzibil din sodiu 3, până la electrodul metalic 2; în acest regim de funcţionare elementul fuzibil 3 poate fi în stare solidă sau în stare lichidă; la apariţia unui defect de tip scurtcircuit, elementul 3, din sodiu, se încălzeşte şi în timp foarte scurt trece în stare de vapori, a căror rezistivitate, mult mai mare decât aceea a sodiului în stare solidă sau lichidă, asigură intervenţia siguranţei fuzibile ca o rezistenţă cu efect de limitare a curentului de defect; în acelaşi timp presiunea mare a vaporilor împinge pistonul 4 care comprimă gazul inert din incinta 5, obţinându-se o acţiune mecanică capabilă să valideze comanda de întrerupere a circuitului defect, dar şi limitarea presiunii vaporilor de sodiu, care atinge valori de 300 MPa; valorile mari ale presiunii din incinta unor asemenea ansambluri impun realizarea tubului 6 din materiale speciale, oxid de beriliu de exemplu, la care se adaugă necesitatea unei bune etanşări, asigurate şi cu ajutorul cilindrului metalic 7 şi a piesei ceramice speciale 8; viteza medie de deplasare a pistonului atinge 15 m/s, iar durata acestei deplasări este de 0,4 ms. După întreruperea circuitului vaporii metalici de sodiu se răcesc, condensează, sunt împinşi de pistonul 4 înapoi către poziţia iniţială, astfel încât devine posibilă o nouă funcţionare.

Dimensiunile de gabarit pentru diferite tipodimensiuni de asemenea siguranţe fuzibile sunt date în Tab.7.10.

Pentru a diminua supratensiunile de comutaţie la funcţionarea unor asemenea siguranţe fuzibile se acceptă şuntarea lor cu un rezistor având rezistenţa R de valoare:

$$\frac{U_f}{I_0} \le R \le 3\frac{U_f}{I_0}, \qquad (7.9)$$

unde I_0 reprezintă valoarea maximă a curentului de scurtcircuit, iar U_f-tensiunea maximă de fază a sursei de alimentare.

Tab.7.10

Dimensiuni	I_n= 100A	I_n= 500A	I_n= 800A
A [mm]	29	41	60
B [mm]	94	165	287
C [mm]	64	90	144
D [mm]	20	30	30
E [mm]	9	16	30

Pentru a ilustra dificultăţile legate de realizarea unor asemenea siguranţe fuzibile cu autorefacere se poate semnala faptul că, la întreruperea curenţilor de scurtcircuit, valorile foarte mari ale presiunii din incintă conduc la modificări ale diametrului cu circa 1,5%, ceea ce modifică valorile curentului de lucru cu 1%.

Tinând seama de frecvenţa de manifestare a curenţilor de scurtcircuit şi de gradul de uzură al tubului ceramic, se preconizează o durată de viaţă pentru asemenea siguranţe fuzibile de 30 de ani, având în vedere chiar şi interacţiunea dintre metalul lichid al fuzibilului şi tubul dielectric.

Impurităţile din materialul tubului ceramic sau din metalul uşor fuzibil al elementului activ pot afecta de asemenea funcţionarea acestor dispozitive, semnalând importanţa unor aspecte tehnologice în realizarea lor.

Considerente similare pot fi remarcate şi cu privire la soluţiile care folosesc mercurul ca lichid conductor.

Se poate aprecia în final că, prin timpul de răspuns şi prin durata de viaţă, aparatele de comutaţie cu contacte metalolichide se vor impune pentru utilizarea industrială ca o alternativă la aparatele clasice de comutaţie. Cu atât mai mult siguranţele fuzibile cu fază lichidă reprezintă o soluţie pentru protecţia semiconductoarelor de putere din instalaţiile industriale existente.

7.3. Tendinţe moderne de realizare a întrerupătoarelor automate de joasă tensiune

Intrerupătoarele automate de joasă tensiune sunt aparate electrice de comutaţie care adaugă la funcţionalitatea contactoarelor, prezentate anterior, posibilitatea de a stabili, suporta şi deconecta curenţii de defect. In aceste condiţii întrerupătoarele clasice pun probleme deosebite cu privire la funcţionarea contactelor electrice în regim de defect, cu privire la stingerea arcului electric de comutaţie, cu privire la dispozitivul de acţionare şi la asigurarea parametrilor cinematici pentru ansamblul mobil, cu privire la acţiunea forţelor electrodinamice la scurtcircuit ca şi cu privire la conservarea în timp a calităţilor acestora. Intrerupătoarele obişnuite care au încercat să rezolve aceste cerinţe s-au dovedit a avea construcţii complexe şi în consecinţă o fiabilitate scăzută. De altfel numărul de manevre ce caracterizează construcţiile obişnuite de întrerupătoare automate de joasă tensiune de exemplu este de doar 10^3, faţă de circa 10^6 manevre în cazul contactoarelor. Au fost deci şi sunt încă pe deplin justificate preocupările specialiştilor pentru realizarea unor întrerupătoare performante de joasă tensiune, capabile să răspundă cerinţelor mereu mai severe impuse de dezvoltarea reţelelor de distribuţie a energiei electrice ca şi de diversificarea consumatorilor.

O primă orientare a preocupărilor specialiştilor a fost aceea de a realiza întrerupătoare ultrarapide, care prin timpul redus de deconectare asigură în acelaşi timp şi un efect de limitare. Aceste performanţe deosebite au fost obţinute prin perfecţionarea unor construcţii clasice, care au permis ameliorarea tuturor aspectelor comutaţiei care condiţionează buna funcţionare a acestor aparate electrice: comutaţia electrică, comutaţia magnetică dar şi comutaţia mecanică. In acelaşi timp s-au folosit şi dispozitive noi de protecţie, capabile să furnizeze în timp mai scurt comenzi convenabile de deconectare a circuitului defect.

O a doua orientare cu privire la realizarea întrerupătoarelor moderne de joasă tensiune, adesea o completare a construcţiilor ultrarapide anunţate mai sus, dezvoltă tehnicile moderne ale comutaţiei de putere expuse anterior: comutaţia sincronizată,

comutaţia hibridă şi comutaţia statică. In cele ce urmează ne vom referi anume la asemenea realizări.

7.3.1. Intrerupătoare cu comutaţie sincronizată

Comutaţia sincronizată, conform celor prezentate anterior, propune deschiderea contactelor aparatului de comutaţie la trecerea naturală prin zero a curentului din circuit. Pentru a asigura acest lucru se impune ca suma timpilor de întârziere cu care intervin fiecare dintre elementele constructive ce contribuie la manevra de deconectare, comandată cu ajutorul unui dispozitiv de sincronizare ce sesizează trecerile naturale prin zero ale curentului, să fie un multiplu întreg de semiperioade; se subînţelege în acest fel faptul că două treceri succesive prin zero ale curentului au loc după o semiperioadă (0,01 s), ceea ce este desigur adevărat doar pentru regimurile permanente normale din circuit. Cum funcţionalitatea de întrerupător presupune sesizarea dar şi deconectarea curenţilor de scurtcircuit, trebuie ţinut seama de faptul că, datorită componentei continue a curentului de defect, două treceri succesive prin zero ale curentului din circuit nu mai au loc la un interval de timp constant, de 0,01 s. Realizarea sincronizării pentru funcţionalitatea de întrerupător este deci mai dificilă, soluţiile propuse trebuind să ţină seama de particularităţile de manifestare a curentului de scurtcircuit. In acest scop s-a impus pe de o parte utilizarea unor soluţii constructive de întrerupătoare automate ultrarapide, care pe lângă împrăştierea cât mai mică a valorilor timpilor de deconectare, justificată anterior pentru comutaţia sincronizată, să permită practic deconectarea la prima trecere naturală prin zero a curentului, deci după timpi de ordinul milisecundelor. O asemenea realizare poate folosi de exemplu declanşatorul electrodinamic pentru deplasarea contactelor mobile şi comanda optică a deconectării, pentru a reduce timpul de deconectare. In plus este necesară analiza evoluţiei în timp a curentului de scurtcircuit pentru a anticipa corect trecerile prin zero, care să permită astfel aplicarea corectă a comenzii de deconectare sincronizată. In legătură cu această problemă semnalăm principiul de comandă a deconectării sincronizate a curenţilor de

defect ce apelează la memorarea valorii I^* a curentului de scurtcircuit, în evoluţia sa crescătoare după trecerea prin zero, corespunzătoare momentului t_0, deci după un interval de timp τ egal cu durata de la comanda de deconectare la momentul desprinderii contactelor întrerupătorului; dacă întrerupătorul pentru care se doreşte ataşarea dispozitivului de sincronizare este de tip ultrarapid, cu valori ale duratei τ de ordinul milisecundei, atunci putem considera doar prima alternanţă a curbei care descrie evoluţia în timp a curentului de scurtcircuit, Fig.7.58; în momentul în care în evoluţia sa scăzătoare curentul de defect are din nou valoarea I^*, deci în momentul t_1, dispozitivul de sincronizare dă comanda de deconectare, astfel încât desprinderea pieselor de contact va avea loc după intervalul de timp τ, deci la trecerea prin zero a curentului. Un asemenea dispozitiv de sincronizare funcţionează desigur şi în cazul regimului permanent normal, când evoluţia în timp a curentului din circuit nu pune în evidenţă o componentă continuă, ca în Fig.1.2.

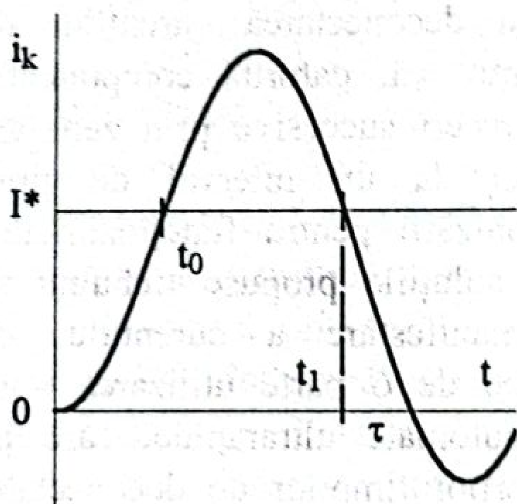


Fig.7.58

Un exemplu de întrerupător sincronizat, prevăzut cu declanşator electrodinamic pentru deconectarea ultrarapidă (Fig.7.59) folosind şi transmiterea optică a comenzii pentru a reduce timpul de răspuns, cuprinde următoarele componente: transformatorul de curent TC, care este conectat la blocul de sincronizare 1, ce memorează valorile I^* ale curentului după intervale de timp τ=1,5...2 ms şi furnizează semnale convenabile de comandă a deconectării către blocul logic 3; dacă la intrarea în blocul logic 3 se aplică şi semnale provenite de la blocul de protecţie prin relee 2 sau corespunzătoare unei comenzi voite de deconectare, la intrarea blocului 4 de prelucrare optică vom obţine un semnal de comandă a deconectării. Acest semnal parcurge linia optică de transmisie 5 şi se aplică receptorului optic 6, de tip fotodiodă, fototranzistor sau fototiristor. Se obţine astfel conturnarea comandată a eclatorului 10

şi deci descărcarea condensatorului C, de valoare 100...300 μF, prin bobina fixă a declanşatorului electrodinamic ce mai conţine şi discul metalic masiv (din cupru sau din aluminiu), 8; la descărcarea oscilantă a condensatorului C, încărcat în prealabil la o tensiune de ordinul kilovolţilor, fluxul magnetic variabil creat induce curenţi turbionari în discul masiv 8, plasat cât mai aproape de bobină şi fixat pe contactul mobil al întrerupătorului 9.

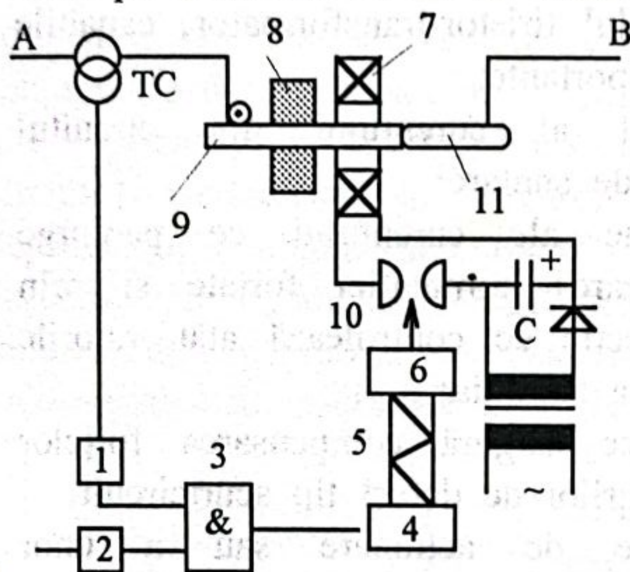


Fig.7.59
Intrerupător sincronizat

Ca urmare a interacţiunii electrodinamice dintre curenţii turbionari din discul 8 şi fluxul magnetic datorat bobinei 7, între acestea se manifestă forţe de respingere ce asigură desprinderea ultrarapidă a contactului mobil 9 de contactul fix 11; se obţin astfel deplasări ale contactului mobil de circa 10...30 mm în timp de 1,5...2 ms, ceea ce presupune accelearţii mecanice de ordinul $3{,}76.10^4$ m/s^2 şi viteze maxime de 56,5 m/s, datorate unor forţe de ordinul a 10^5 N, [3].

Principalele avantaje ale întrerupătoarelor cu comutaţie sincronizată se referă la:

-durata foarte scurtă de ardere a arcului electric, ce asigură micşorarea uzurii contactelor şi a elementelor active;

-scăderea nivelului de ionizare în zona camerei de stingere, care permite eventual chiar creşterea valorilor curentului nominal la aceeaşi cursă a contactelor mobile;

-creşterea vitezei de refacere a rigidităţii dielectrice între piesele de contact la întrerupere, care permite renunţarea la rezistenţa de şuntare impusă de vitezele mari de creştere ale tensiunii tranzitorii de restabilire.

Ca dezavantaj important semnalăm complexitatea construcţiilor de întrerupătoare sincronizate, numărul mare de componente anunţând desigur şi o fiabilitate scăzută.

7.3.2. Intrerupătoare cu comutaţie hibridă

După cum s-a semnalat deja, creşterea vitezei de depistare a defectelor şi scăderea timpului de întrerupere, cu eventuala limitare a valorilor maxime ale curentului de scurtcircuit, reprezintă preocupările dominante în domeniul realizării întrerupătoarelor moderne de joasă tensiune. Intreruptoarele cu comutaţie hibridă au impus soluţii care folosesc ansamblul tiristor-transformator, capabile să rezolve următoarele probleme importante:

-transferul cât mai rapid al curentului din circuitul contactelor în circuitul tiristoarelor de şuntare;

-limitarea valorilor maxime ale curentului ce parcurge tiristoarele de şuntare, prin utilizarea comutaţiei forţate şi prin acceptarea unor elemente de protecţie ce controlează atât valorile curentului cât şi viteza de creştere a acestuia;

-utilizarea unor contacte ce asigură compensarea forţelor electrodinamice mari, proprii regimurilor de defect tip scurtcircuit;

-folosirea unor dispozitive de acţionare sau a unor construcţii speciale de întrerupătoare, ce asigură deschiderea ultrarapidă a contactelor.

Schema de principiu a unui întrerupător cu comutaţie hibridă trebuie să cuprindă deci următoarele componente: aparatul de comutaţie de bază, de preferat un întrerupător ultrarapid, schema de forţă pentru preluarea conducţiei şi pentru comutaţia forţată de blocare a semiconductoarelor de şuntare, blocul de accelerare a transferului de curent din circuitul contactelor principale în circuitul tiristoarelor de şuntare, blocul de limitare a supratensiunilor de comutaţie, schema de comandă şi blocul de alimentare.

Schema de comandă trebuie să includă traductoarele de curent ataşate unui bloc de prtecţie maximală clasică, dar şi traductorul de viteză de creştere a curentului, ce anticipează valorile de curent periculoase pentru semiconductoarele schemei.

Viteza de transfer a curentului din circuitul contactelor în circuitul tiristoarelor de şuntare depinde în principal de tensiunea de arc scurt, u_a=10...15 V şi de inductivitatea L_k a conturului de şuntare, ce include în circuit semiconductoarele comandate pentru preluarea conducţiei, care chiar pentru construcţii îngrijite nu scade

sub 1...2 μH; în aceste condiții se poate aprecia că viteza maximă de trecere a curentului de pe contactele aparatului de bază în circuitul tiristoarelor nu depășește 10 A/μs. Cum acest transfer de curent nu decurge instantaneu, pentru o valoare I_0 a curentului în momentul separării contactelor, la momentul preluării depline a conducției curentul va avea o valoare I_{max}, de obicei de 1,5...2 ori mai mare ca I_0; rezultă deci și necesitatea creșterii capacității condensatorului ce intervine în schema de comutație forțată pentru a asigura blocarea tiristoarelor de șuntare și efectul de limitare.

Analiza proceselor tranzitorii de transfer a curentului din circuitul contactelor în circuitul tiristoarelor de șuntare indică dependența timpului de transfer t^*, în principal de valoarea curentului în momentul desprinderii contactelor I_0, și de valoarea inductivității conturului de șuntare L_k (Fig.7.60) evidențiindu-se valori critice ale factorilor de influență, [20].

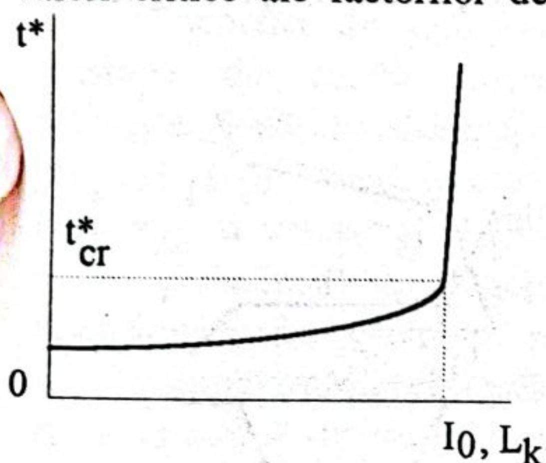
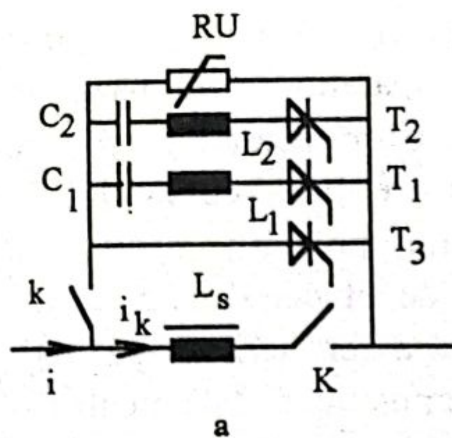


Fig.7.60

Pentru un întrerupător având curentul nominal I_n=4 kA de exemplu, valoarea curentului limitat este de $1,5I_n$, timpul de deschidere a contactelor de tip punte este de 0,5 ms, pentru comutația hibridă a unor curenți de scurtcircuit de 100 kA la tensiunea de 380 V, în condițiile în care pentru a evita valorile critice ale parametrilor se preferă folosirea a patru blocuri independente identice conectate în paralel. Rezultă astfel valori t^*=80 μs, pentru capacitatea condensatorului de comutație forțată de 2000 μF. Se poate afirma că dispozitivul ultrarapid de acționare al întrerupătorului are o influență favorabilă asupra scăderii capacității condensatorului, [20].

O variantă de schemă ce asigură accelerarea procesului de transfer a curentului în situații de defect din circuitul contactelor K ale aparatului către tiristoarele de șuntare (Fig.7.61a) conține pe lângă elementele obișnuite T_2, C_2, L_2, T_3 și varistorul RU, elementele L_1, C_1, T_1 și bobina de șoc L_s, cu ciclu de magnetizare rectangular, Fig.7.61b.



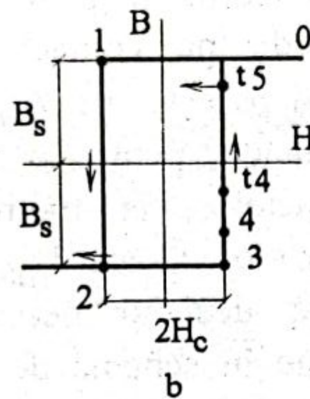


Fig.7.61
Intrerupător hibrid de curent continuu

O altă variantă de întrerupător hibrid de curent continuu este prezentată în Fig.7.62a, evoluţia diferitelor mărimi în timpul procesului de deconectare la defect de tip scurtcircuit fiind ilustrată în Fig.7.62.b. Schema propusă foloseşte două transformatoare de curent, TC_1 şi TC_2, primul saturat datorită curentului i_1 ce asigură inducţia magnetică în miezul său de valoare $+B_s$ în timp ce pentru al doilea inducţia magnetică în miez este $-B_s$ pe seama înfăşurării de premagnetizare

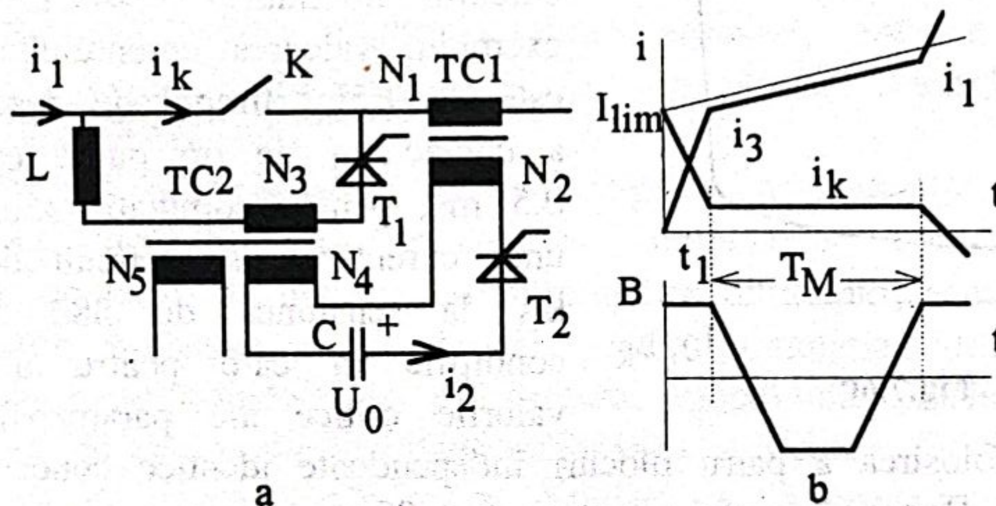


Fig.7.62
Intrerupător hibrid de c.c.

N_5. Funcţionarea pentru deconectarea hibridă a curentului de scurtcircuit decurge astfel: atunci când curentul din circuit devine de valoare I_{lim} se comandă trecerea în conducţie a tiristoarelor T_1 şi T_2. Tensiunea de la bornele condensatorului C se aplică practic pe înfăşurarea N_4, miezul magnetic al TC_1 fiind saturat, astfel încât, în înfăşurarea N_3 apare un curent i_3 de sens invers lui i_1, a cărui evoluţie crescătoare în timp se opreşte în momentul t_1. Numerele

de spire ale transformatoarelor de curent TC_1 şi TC_2 se aleg astfel încât $i_3=i_1$, pentru $i_k=0$, rezultând:

$$N_1N_4=N_2N_3. \quad (7.10)$$

Principalul avantaj al unei asemenea scheme îl constituie rapiditatea cu care se poate obţine întreruperea, întârzierile referindu-se doar la timpul t_1, în condiţiile în care se utilizează materiale magnetice cu ciclu de histerezis îngust.

Ca dezavantaj semnalăm dependenţa timpului T_M de valorile curentului întrerupt ca şi numărul mare de transformatoare de curent. Intrerupătoarele de curent continuu cu comutaţie hibridă se realizează obişnuit conform schemei date în Fig.7.38a, cu posibilităţi de optimizare a parametrilor componentelor, vizând în principal diminuarea capacităţii condensatorului.

Schema de principiu a unui întrerupător automat de joasă tensiune de curent alternativ cu comutaţie hibridă, Fig.7.63, foloseşte două transformatoare de curent, având înfăşurările primare N_{11} şi N_{12}, fiind prevăzute cu câte două înfăşurări secundare, N_{21}-N_{22} şi respectiv N_{23}-N_{24}.

Principiul de funcţionare este următorul: la apariţia unui scurtcircuit, de exemplu pentru orientarea curentului indicată în figură, după transferul curentului din circuitul contactelor principale K în circuitul de şuntare cu tiristorul T_1 se conectează schema de comandă pentru trecerea în conducţie a tiristoarelor T_3 şi T_5 astfel încât condensatorul C, încărcat cu o tensiune având polaritatea idicată, furnizată de blocul de încărcare IC, se conectează în paralel cu T_1, producând blocarea sa.

Curentul total din circuit se împarte în trei componente: curentul i_c prin condensator, curentul i_1 prin rezistorul R, N_{21}, D_1 şi curentul i_2 care se închide pe traseul D_3, N_{23}, R. Deoarece transformatoarele de curent se adoptă identice, cu N_1 spire în primar şi N_2 spire în fiecare dintre secţiunile înfăşurărilor secundare, neglijând curentul de magnetizare se pot scrie relaţiile:

$$N_1i=2N_2i_R, \quad i_R=i_1=i_2, \quad i=i_c+2i_R, \quad i_c=(1-k)i, \quad k=N_1/N_2 \quad (7.11)$$

Considerând tensiunea de blocare a tiristorului T_1 de forma:

$$U_{T1}=U_c-e_1 \tag{7.12}$$

corespunzător conturului C, R, N_{21} se poate scrie ecuaţia:

$$e_2 = U_c + R\, i_R, \quad e_2 = k\, e_1, \tag{7.13}$$

unde e_2 reprezintă t.e.m. de autoinducţie ce se manifestă pe înfăşurarea N_{21}. Se poate scrie în final, pentru U_{T1}, o relaţie de forma:

$$U_{T1}=U_C(1-k)-\frac{1}{2}Rk^2 i=U_{C0}(1-k)-\frac{(1-k)^2}{C}\int i(t)dt-\frac{1}{2}Rk^2 i \tag{7.14}$$

evidenţiind astfel un efect de mărire a capacităţii echivalente ce intervine în schemă.

Definirea parametrilor electrici pentru componentele schemei rezultă practic prin analiza comportării de regim dinamic a circuitului şi trebuie să răspundă unor criterii de optimizare funcţională sau de nuanţă tehnico-economică. Realizările trifazate conţin trei module monofazate acţionate independent, problemele care se pun fiind similare cu cele prezentate anterior.

O menţiune specială se impune cu privire la dispozitivele de acţionare, mai folosite pentru aparatele electrice ce sunt utilizate în schemele cu comutaţie hibridă fiind dispozitivele electromagnetice.

Funcţionarea ultrarapidă a ansamblului impune soluţii de forţare a regimului tranzitoriu, în construcţii cu două bobine (una de impuls şi o a doua de menţinere) şi alimentare în curent continuu, cu efecte favorabile atât din punct de vedere al performanţelor cât şi din punct de vedere al consumului de energie.

7.3.3. Intrerupătoare cu comutaţie statică

Primele informaţii cu privire la realizarea de serie a unor întrerupătoare statice se datorează firmei americane Allis-Chalmers, ele funcţionând cu o caracteristică de protecţie de tip

semidependent, dependentă pe porţiunea corespunzătoare curenţilor de suprasarcină şi independentă, cu deconectare instantanee, pentru curenţii de scurtcircuit. Preocupările pentru realizarea unor asemenea aparate electrice de comutaţie s-au extins apoi continuu, în principal datorită scăderii preţului de cost al semiconductoarelor, dar şi ca urmare a scăderii gabaritului respectiv a creşterii performanţelor acestora. Acceptate la început mai ales pentru valori mari ale curentului nominal, peste 600 A, în prezent întrerupătoarele statice realizate de firme de prestigiu din întreaga lume se referă la tipodimensiuni având valori ale curentului nominal de la circa 100 A la 4000 A, caracteristicile de protecţie prezentând de obicei trei porţiuni distincte, pentru a permite folosirea cât mai deplină a posibilităţilor fizice ale consumatorului în timpul funcţionării.

Utilizările întrerupătoarelor statice au evoluat de asemenea, funcţia de la întrerupător de fider cu deconectare ultrarapidă şi cu efect de limitare a curentului de defect, la funcţia de întrerupător specializat pentru asigurarea selectivităţii în scheme de distribuţie complexe, cu mai multe tipuri de aparate electrice de comutaţie în componenţă.

Pentru a asigura funcţionalitatea de întrerupător cu comutaţie statică, se impune completarea schemelor de forţă tipice pentru comutaţia statică, prezentate în § 7.2.5, cu elemente specializate pentru a asigura protecţia de curent, care să controleze atât valorile curentului din circuit cât şi viteza de creştere a acestuia, anticipând printr-o comandă convenabilă de deconectare valorile curentului periculoase pentru dispozitivele semiconductoare ale schemei; în plus se impune renunţarea la comutaţia naturală a tiristoarelor în favoarea comutaţiei forţate, ce permite obţinerea dorită a deconectării ultrarapide, cu efect de limitare a curenţilor de scurtcircuit. Aceasta conduce desigur la structuri mai complexe ale schemelor întrerupătoarelor statice, atât pentru circuitul de forţă cât şi pentru circuitul de comandă.

Schema de principiu a unui întrerupător static trifazat de curent alternativ, Fig.7.64, evidenţiază în structura sa următoarele componente:

-blocul de forţă, BF, ce cuprinde trei module de comutaţie, MC, conţinând fiecare câte două tiristoare antiparalel şi o inductanţă

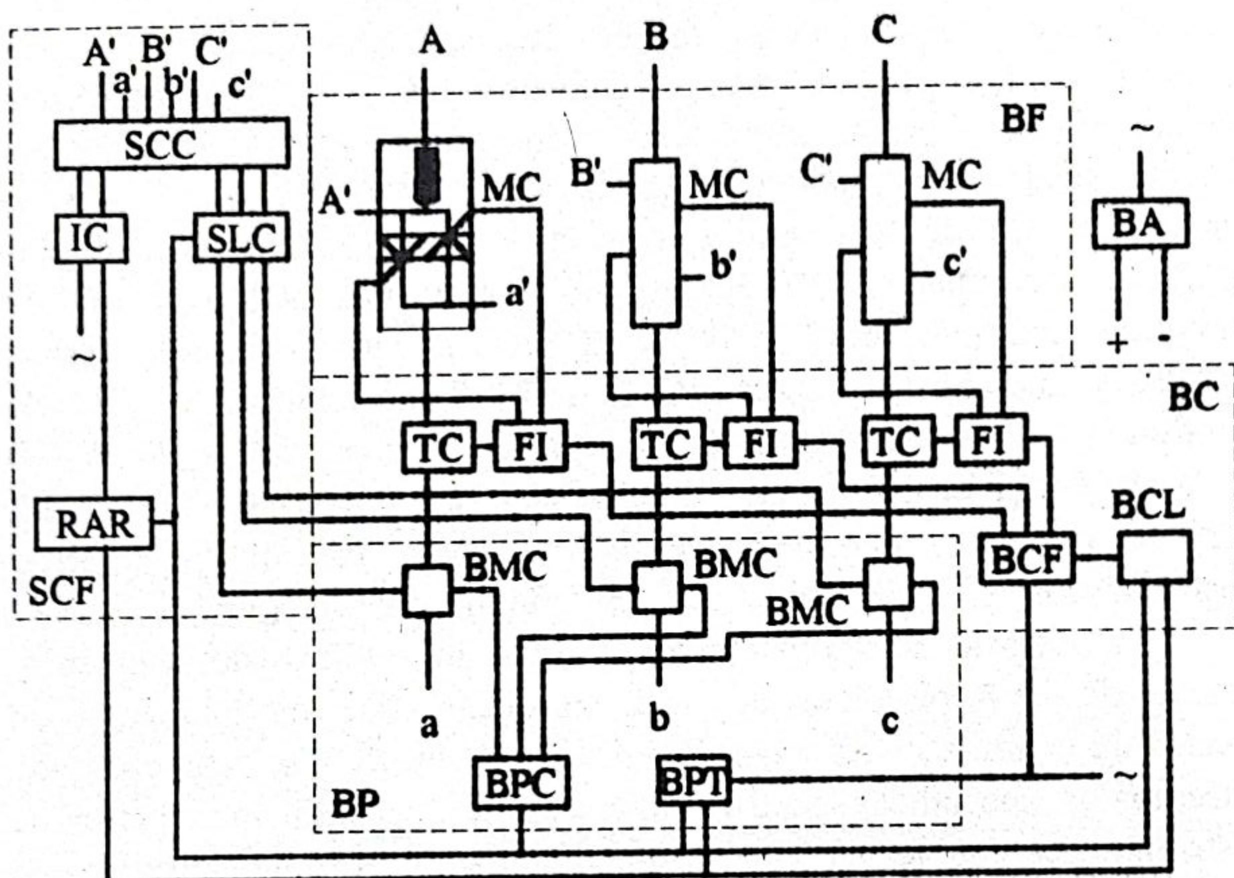


Fig.7.64
Intrerupător static. Schemă bloc

de protecție ce limitează viteza de creștere a curentului din circuit dar și amplitudinea curentului de scurtcircuit;

-blocul de comandă BC, ce conține blocul de comenzi logice BCL, blocul de control al fazei BCF, formatorul de impulsuri FI și traductoarele de curent, TC; în blocul de comenzi logice BCL, se realizează selecția și memorarea semnalelor ce provin de la elementele de comandă sau de protecție; la comanda de conectare, blocul BCF asigură funcționarea formatoarelor de impulsuri FI și deci comanda convenabilă a câte unuia dintre tiristoarele antiparalel ale modulelor de comutație MC, durata acestor impulsuri fiind controlată cu ajutorul traductoarelor de curent TC; modificarea fazei impulsurilor furnizate de blocul BCF permite obținerea unor diferite regimuri de funcționare ale ansamblului;

-blocul de protecție BP, ce cuprinde subansamblurile specializate pentru protecția de curent, BPC și respectiv pentru

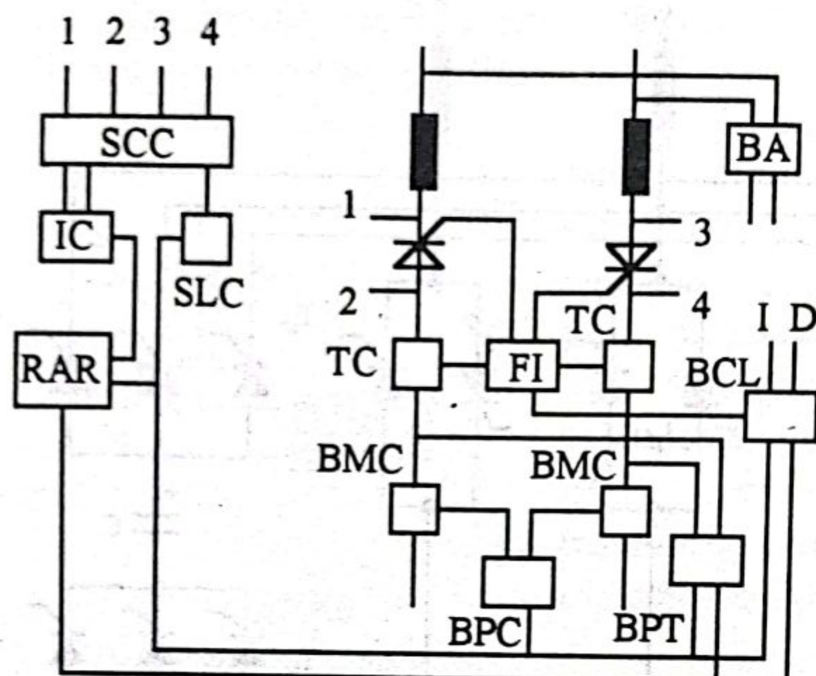


Fig.7.65
Intrerupător static de c.c.

protecţia de tensiune, BPT; se identifică astfel regimurile de supracurenţi, de întrerupere a unei faze, de modificare a nivelului tensiunii pe una dintre faze, având în vedere şi funcţionarea RAR; semnalele la intrare sunt furnizate de blocul de măsură curent, BMC şi respectiv tensiunile de fază ale reţelei, la ieşirea BP rezultând semnale de deconectare aplicate blocului de comenzi logice, BCL;

-sistemul de comutaţie forţată SCF cuprinde schema de comandă a comutaţiei SCC, ansamblul pentru încărcarea condensatoarelor pentru comutaţia forţată IC, ansamblul pentru RAR şi schema logică de comandă SLC, care furnizează semnale convenabile pentru blocarea tiristoarelor în conducţie ale MC;

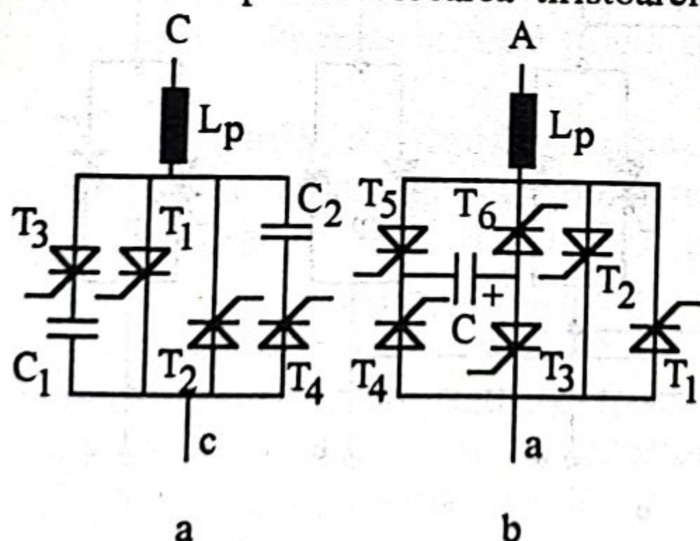
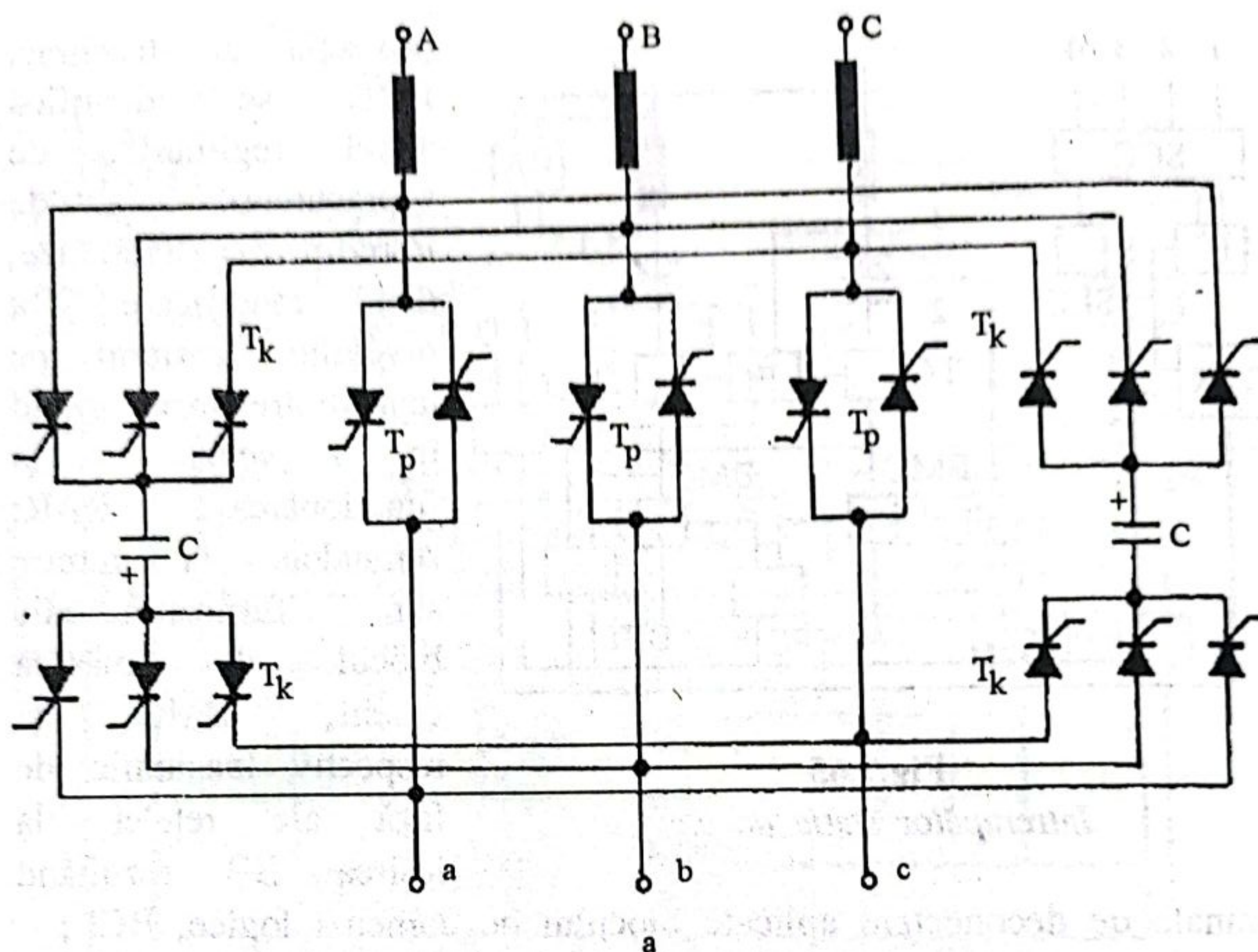


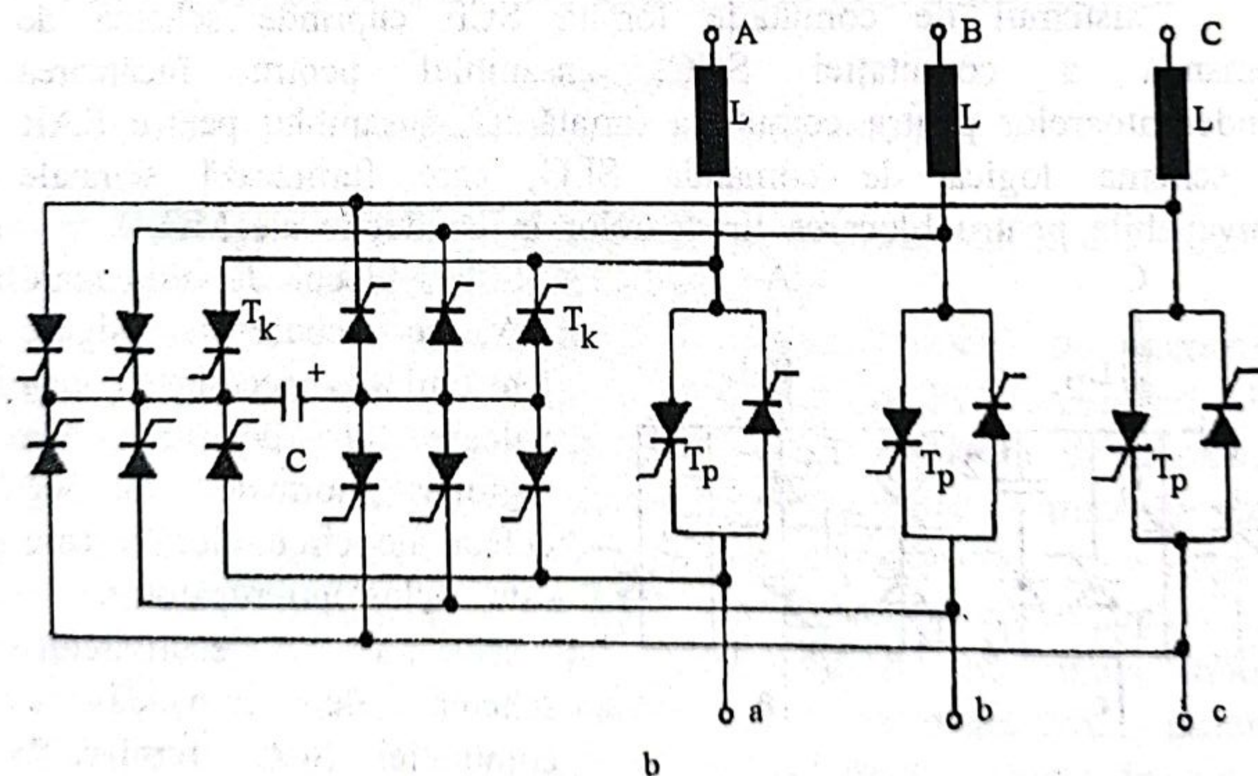
Fig.7.66.
Circuite de stingere

-blocul de alimentare BA, ce trebuie să asigure tensiunile necesare, ca valoare şi polaritate, la regimuri normale sau de defect ale circuitului în care este inclus întrerupătorul.

La scurtcircuit, schema de comandă a comutaţiei SCC, furnizează semnal de comandă la schema logică de comandă SLC, ce primeşte semnal şi



a



b

Fig.7.67

Circuite de stingere trifazate

de la blocul de comenzi logice BCL, asigurându-se blocarea blocului de comutaţie BC.

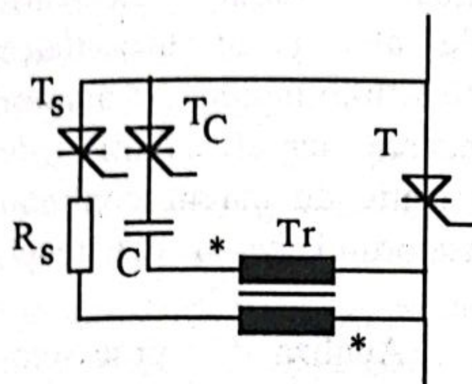


Fig.7.68
Circuit pentru diminuarea supratensiunilor

Schema de principiu a unui întrerupător static de curent continuu este desigur similară, diferind de cea anterioară prin numărul căilor de curent, prin realizarea modulului de comutaţie MC (folosind un singur tiristor) prin excluderea blocului de control al fazei BCF, ca şi prin substituirea transformatoarelor de curent cu traductoare de curent continuu, Fig.7.65.

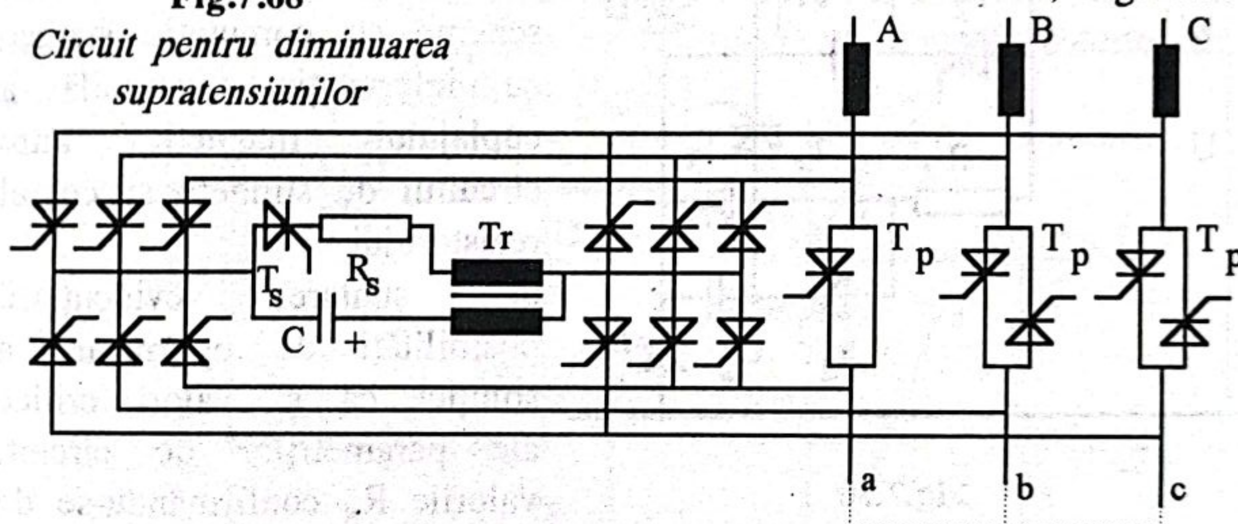


Fig.7.69
Variantă trifazată pentru diminuarea supratensiunilor

Pentru a realiza micşorarea timpului de conducţie al tiristoarelor modulului de comutaţie MC în condiţii de scurtcircuit, se apelează la comutaţia forţată pentru blocarea acestora, folosind condensatoare auxiliare convenabil încărcate, care se descarcă cu un curent invers prin tiristorul ce trebuie blocat. Modul în care aceste condensatoare, aparţinând SCC, sunt conectate la bornele tiristoarelor principale în cazul unui întrerupător static monofazat este ilustrat în Fig.7.66. Cele două moduri de realizare a SCC în cazul întrerupătoarelor statice trifazate este prezentat în Fig.7.67.

Analiza riguroasă a proceselor tranzitorii corespunzătoare funcţionării întrerupătoarelor statice în condiţii normale sau de defect permite definirea mai riguroasă a parametrilor schemelor de

principiu, în concordanță cu eventuale criterii de optimizare a construcției acestora, având în vedere în același timp pe de o parte necesitatea limitării șocului de curent datorat încărcării condensatoarelor la conectare, iar pe de altă parte necesitatea limitării supratensiunilor datorate comutației ultrarapide a acestor aparate. Astfel de exemplu, pentru diminuarea supratensiunilor de comutație la funcționarea unui întrerupător static de curent continuu se poate apela la soluția șuntării condensatorului cu o rezistență, R_s, Fig.7.68.

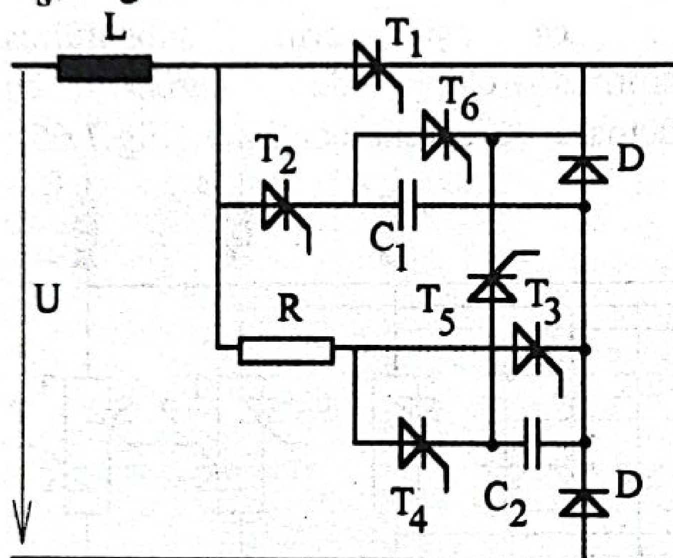


Fig.7.70
Intrerupător static de c.c.

Analiza proceselor tranzitorii legate de funcționarea unei asemenea scheme cu comutație statică, cu intervenția favorabilă a cuplajului magnetic între circuitul de stingere și cel al rezistorului de șuntare, evidențiază posibilități de optimizare a soluției ca și valori critice ale parametrilor de circuit, valorile R_s confirmându-se de ordinul 0,5 Ω. Varianta trifazată a unei asemenea scheme este ilustrată în Fig.7.69.

De menționat faptul că opțiunea pentru schemele cu un singur condensator sau cu două condensatoare ține seama de funcționarea întrerupătoarelor statice în scheme cu neutrul tratat sau nu, pe lângă considerentele de gabarit și preț de cost care pot justifica o anumită soluție.

O primă variantă de întrerupător static de curent continuu este prezentată în Fig.7.70, asigurând limitarea supratensiunilor de comutație pe seama unei rezistențe de șuntare. Etapele de funcționare ale unui asemenea ansamblu sunt: trecerea în conducție a tiristoarelor T_2 și T_3 într-o primă secvență, cu blocarea tiristorului T_1 și transferul curentului în circuitul paralel R-C astfel obținut; curentul din circuit va fi limitat de rezistența R ca și de

rezistența circuitului exterior; o parte a energiei înmagazinate în inductanța L va fi disipată pe rezistența R; într-o a doua secvență se trece în conducție tiristorul T_4, se blochează T_3 și se realizează deconectarea circuitului; capacitățile C_1 și C_2 ca și rezistența R definesc supratensiunile de comutație, creșterea valorilor R de exemplu conducând la creșterea valorilor U_{c1max} și respectiv la scăderea tensiunii U_{c2max}. Descărcarea condensatoarelor se poate realiza pe sarcină prin trecerea în conducție a tiristoarelor T_5 și T_6. Principalul dezavantaj al schemei prezentate se referă la necesitatea de a folosi două baterii de condensatoare, cu efecte nefavorabile asupra gabaritului dar și asupra prețului de cost. O soluție care permite realizarea comutației statice de curent continuu cu funcționalitatea de întrerupător și folosind o singură baterie de condensatoare este prezentată în Fig.7.71a.

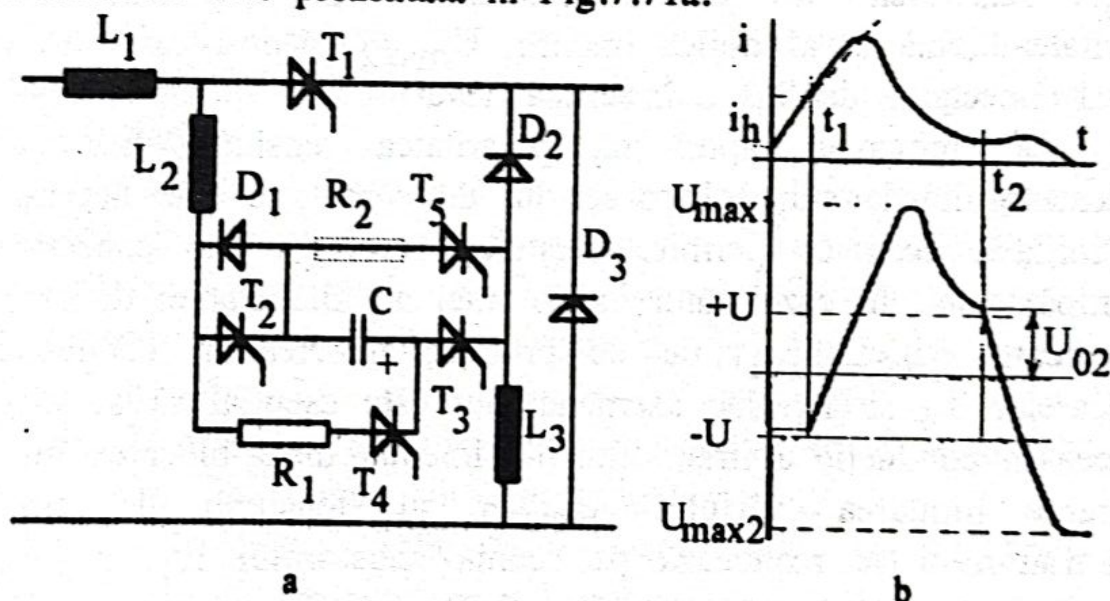


Fig.7.71

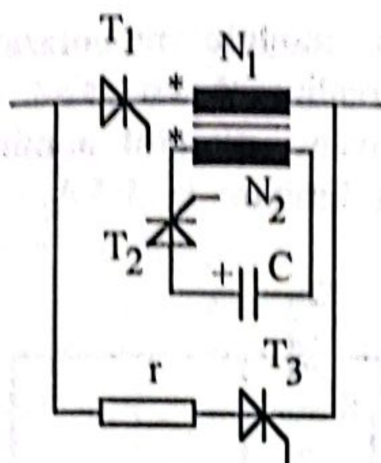
Intrerupător static de c.c. folosind o singură baterie de condensatoare

In regim normal de funcționare, datorită trecerii curentului prin tiristorul T_1 condensatorul se încarcă la tensiunea U a sursei, cu polaritatea indicată; încărcarea condensatorului se poate realiza de la tensiunea sursei și prin aplicarea unor impulsuri periodice de comandă pe porțile tiristoarelor T_4 și T_5. Dioda D_2 și bobina de reactanță L_3 asigură timpul minim de încărcare a condensatorului, chiar pentru valori mari ale rezistenței de sarcină. La apariția unui scurtcircuit și creșterea curentului până la valoarea i_0, Fig.7.71b, în schemă se comandă trecerea în conducție a tiristoarelor T_2 și T_3,

asigurându-se conectarea condensatorului la bornele tiristorului T_1, blocarea acestuia și schimbarea polarității tensiunii la bornele condensatorului, cu creșterea acesteia până la valoarea U_{max1}; limitarea valorii supratensiunii U_{max1} este asigurată prin trecerea în conducție a tiristorului T_4, ce realizează șuntarea condensatorului cu rezistorul R_1. Pentru descărcarea condensatorului la scăderea valorilor curentului se folosește dioda D_1. A doua etapă a comutației intervine prin trecerea în conducție a tiristorului T_5, după un interval de timp suficient pentru blocarea tiristorului T_2 și scăderea curentului până la valoarea limitată de rezistența exterioară a circuitului de sarcină și de R_1. Deoarece în momentul t_2 polaritatea tensiunii condensatorului este inversă față de cea inițială, se obține blocarea tiristorului T_3 și trecerea curentului prin R_1-T_4-C-T_5. Tensiunea la bornele condensatorului își schimbă iar polaritatea, până la al doilea maxim, U_{max2}, pentru care intervine deci deconectarea deplină a întrerupătorului.

De remarcat faptul că polaritatea tensiunii la bornele condensatorului la sfârșitul procesului de comutație este aceeași cu cea inițială, ceea ce permite creșterea frecvenței de conectare a întrerupătorului. In cazul unor valori mici ale inductanței de sarcină, deci pentru $U_c<U_{max1}$, nu se produce trecerea în conducție a tiristoarelor T_4 și T_5. De asemenea nu este esențial să se asigure trecerea în conducție a tiristorului T_5 imediat după blocarea lui T_2, deoarece limitarea vârfului U_{max2} al tensiunii la bornele condensatorului se realizează pe seama rezistorului R_1. In același scop se poate introduce în circuitul tiristorului T_5 un rezistor R_2, a cărui valoare maximă se alege din condiția blocării sigure a tiristorului T_3. Avantajele schemei legate de frecvența mare de conectare, de utilizarea deplină și eficientă a condensatorului, limitarea eficientă a supratensiunilor de comutație, sunt dublate de dezavantaje cu privire la limitarea mai slabă a curenților de scurtcircuit, datorită comutației de tip derivație, ca și cele referitoare la regimul termic nefavorabil din cauza disipării energiei reactive pe rezistorul R_1, deci în incinta întrerupătorului. Nu e de neglijat nici complexitatea schemei.

Creșterea capacității de limitare a curenților de scurtcircuit se poate realiza folosind o schemă cu comutație forțată și



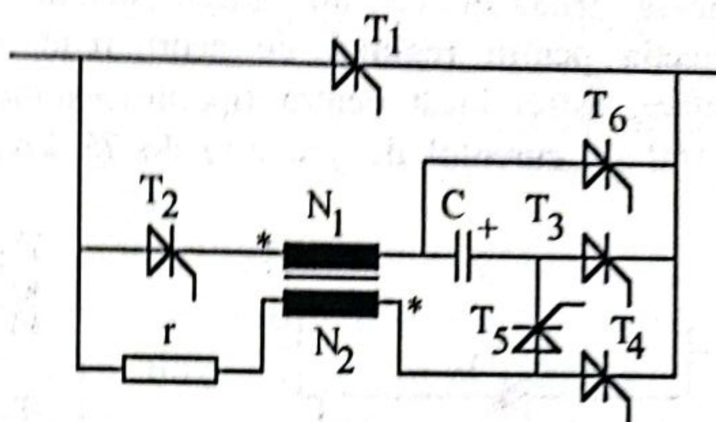


Fig.7.72 **Fig.7.73**

Scheme de limitare a curentului de scurtcircuit

transformator de separare a condensatorului, Fig.7.72. La conectarea tiristoarelor T_2 şi T_3, t.e.m. ce apare în înfăşurarea N_1 a transformatorului asigură un curent în circuitul rezistorului de limitare r, astfel încât blocarea tiristorului T_3 este asigurată tot cu comutaţie paralel.

Dezavantajul schemei îl reprezintă valorile mari ale capacităţii ca şi consumul de materiale feromagnetice. Scăderea capacităţii condensatorului, cu efecte favorabile şi asupra preţului de cost respectiv al gabaritului ansamblului, se obţine folosind soluţia ilustrată în Fig.7.73, care asigură o repartiţie convenabilă a curentului la divizarea acestuia între capacitatea C şi rezistorul r, pe seama t.e.m. ce apar în înfăşurările unui transformator ce completează în fapt o schemă de forma celei din Fig.7.71a. Se micşorează astfel curentul prin condensator, ceea ce permite în consecinţă diminuarea valorii capacităţii acestuia. In plus scad şi supratensiunile de comutaţie.

De altfel, compararea multitudinii de scheme de principiu ce permit realizarea întrerupătoarelor statice de curent continuu, considerând ca indicatori fiabilitatea, respectiv dimensiunile de gabarit şi preţul de cost, indică drept soluţie mai reuşită varianta prezentată în Fig.7.71.a.

Informaţiile din literatură [19], indică performanţele a două serii de întrerupătoare statice de curent alternativ de joasă tensiune. Pentru seria ПР31, realizată cu tipodimensiuni pentru curenţi nominali de 63...160 A şi tensiune nominală de 380 V, asigură

varianta trifazată ca un ansamblu de trei module monofazate. Protecţia pentru regimul de scurtcircuit se realizează cu efect de limitare, astfel încât pentru tipodimensiunea având curentul nominal de 160 A, curentul de şoc este de 75 kA, cu limitare la 4 kA.

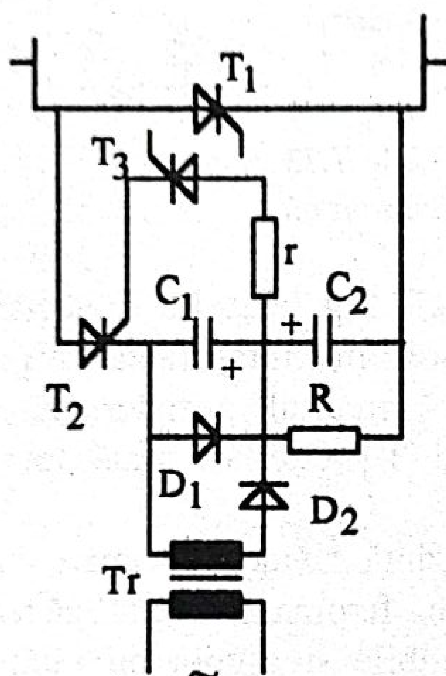


Fig.7.74
Intrerupător static tip ПР31

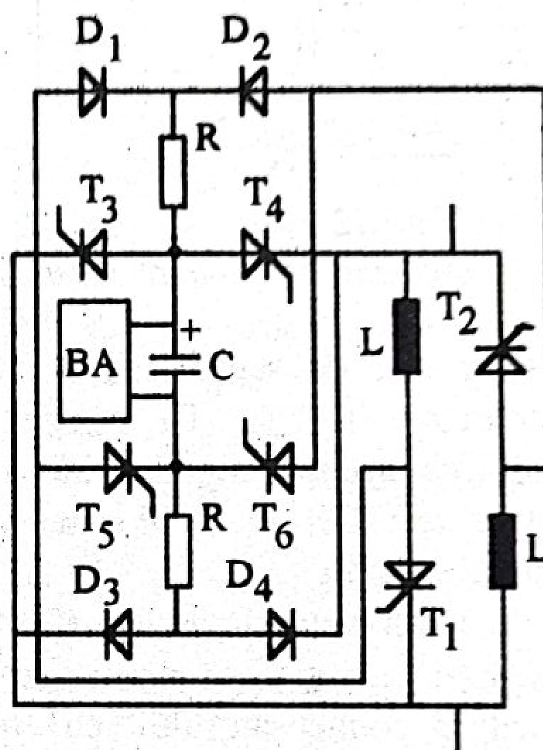


Fig.7.75
Intrerupător static VA 81

Schema de principiu a unui asemenea întrerupător static, pentru o alternanţă, este dată în Fig.7.74 şi evidenţiază tiristorul principal T_1, tiristorul pentru comutaţia forţată T_2, comandat cu ajutorul tiristorului de mică putere T_3. Blocarea tiristorului principal este asigurată de condensatorul C_1, în timp ce ansamblul C_2 şi R realizează diminuarea supratensiunilor de comutaţie.

Intrerupătoarele statice din seria VA 81 se folosesc pentru tensiuni nominale de 380 V, 50 Hz, cu tipodimensiuni având curenţii nominali de la 250 A la 1000 A. Remarcabilă este frecvenţa de conectare de 7200 cicluri/oră, dar şi puterea semnalului de comandă de doar 0,05 W. Schema blocului de comutaţie al unui asemenea întrerupător este dată în Fig.7.75. La funcţionarea unor asemenea aparate de comutaţie se asigură o caracteristică de

protecţie dependentă pentru domeniul curenţilor de suprasarcină, cu deconectare instantanee la scurtcircuit în timp de 10 ms, cu posibilitatea de RAR după 40 ms de la deconectarea defectului, controlându-se atât succesiunea fazelor cât şi nivelul tensiunii reţelei care nu trebuie să scadă sub $0{,}7U_n$.

Se semnalează de asemenea seria de întrerupătoare statice de curent continuu tip VA 83, pentru curenţi nominali de la 80 A la 650 A, ce folosesc tiristoare cu timp de blocare de 100 μs.

Progresele tehnologice în domeniul semiconductoarelor comandate de putere, asigură continua ameliorare a performantelor unor asemenea aparate de comutaţie, cu o mare diversitate de soluţii constructive Se impune deci identificarea unor indicatori tehnico-funcţionali care să permită alegerea corectă a situaţiilor pentru care o anumită soluţie este mai eficientă.

7.4. Concluzii

Evoluţia actuală în domeniul aparatelor electrice de comutaţie de joasă tensiune a conturat două orientări importante şi anume:

-realizarea unor aparate de concepţie clasică cu preformanţe ridicate, ce a condus prin optimizarea construcţiei şi alegerea mai judicioasă a materialelor, la variantele ce asigură comutaţia ultrarapidă, eventual cu efect de limitare a curentului de scurtcircuit;

-definirea unor noi principii de funcţionare a aparatelor electrice de comutaţie, capabile să asigure întreruperea circuitelor chiar fără arc electric care, asociate cu dezvoltarea şi perfecţionarea tehnologiilor de realizare a semiconductoarelor comandate de putere, au impus comutaţia sincronizată, hibridă şi statică.

Una dintre problemele importante care s-au pus în contextul existenţei acestei diversităţi de soluţii pentru realizarea comutaţiei în instalaţiile de joasă tensiune la o funcţionalitate dată, a fost definirea unor criterii sau a unor reglementări, care să permită justificarea opţiunii pentru una sau alta dintre variante. Menţionăm faptul că nu există încă în prezent asemenea criterii şi din acest motiv considerăm cu atât mai important să prezentăm informaţii

care să permită cititorului compararea soluţiilor ce asigură comutaţia cu contacte C, hibridă H şi statică S, pentru o funcţionalitate dată a aparatelor de comutaţie, aceea de contactor de exemplu şi pentru diferite valori ale curentului nominal. Datele prezentate în Tab.7.11 de exemplu, se referă la contactoare, pentru regim de funcţionare AC4 la curent maxim I_k, numărul de manevre electrice N_e şi mecanice N_m, exprimate în milioane manevre, masa ansamblului M [Kg], volumul V[dm^3]. Desigur compararea datelor indicate în Tab.7.11 trebuie realizată pentru un acelaşi număr de manevre pentru a furniza informaţii concludente.

Tab.7.11

Parametru	I_k	N_e	N_m	V	M
I_n=63A, C	227	0.4	16	5	-
I_n=63A, H	227	5	16	5.42	4.85
I_n=63A, S	163	20	20	138	85
I_n=160A, C	385	0.2	10	26.5	10.9
I_n=160A, H	576	5	10	36.7	23
I_n=160A, S	413	20	20	179	100
I_n=250A, C	575	0.2	10	45.8	23.5
I_n=250A, H	900	5	10	56	41.5
I_n=250A, S	645	20	20	324	165
I_n=400A, C	720	0.1	10	77.3	39.5
I_n=400A, H	1440	5	10	85.8	72
I_n=400A, S	1034	20	20	405	220
I_n=630A, C	1135	0.1	10	126.4	66
I_n=630A, H	2268	5	10	108.6	102
I_n=630A, S	-	-	-	-	-

De subliniat faptul că deşi pentru comutaţia statică numărul de manevre electrice este de 20 milioane, limitat practic de tiristor, nu este util să se depăşească numărul de manevre electrice de 5 milioane.

In Fig.7.76 se prezintă dependenţa masei unor aparate de comutaţie cu funcţionalitate de contactor (cu contacte-C, hibrid-H sau static-S), în funcţie de curentul de lucru pentru care numărul de

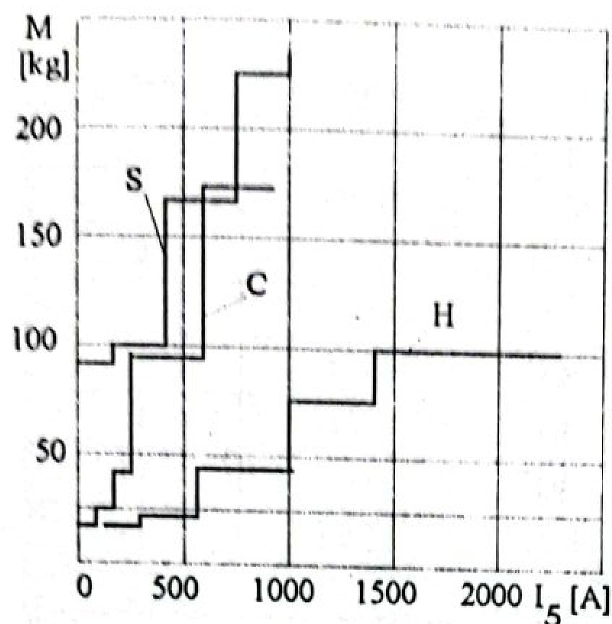


Fig.7.76

manevre electrice este de 5 milioane, I_5. Comparând aceste realizări se observă avantajele comutației hibride, mai ales în domeniul curenților nominali mari. De remarcat și faptul apelând la forțarea regimului tranzitoriu pentru electromagneții de acționare, în cazul aparatelor cu comutație hibridă, rezultă o scădere importantă a masei dar și a gabaritului ansamblului, ca și o economie de cupru, datorată de exemplu eliminării bobinei de suflaj magnetic.

O comparație încă mai concludentă a tehnicilor moderne de comutație la joasă tensiune poate considera pierderile de putere ce intervin în funcționarea unor asemenea ansambluri, care cuprind:

-pierderile în bobina electromagnetului de acționare, P_b;
-pierderile în contactele aparatului, în poziția închis, P_k;
-pierderile în arcul electric de comutație, P_a;
-pierderile în circuitele de comandă-protecție, P_c.

Considerând informațiile prezentate în Tab.7.12 se remarcă scăderea pierderilor de putere pe contacte prin folosirea comutației hibride, dar și reducerea considerabilă a pierderilor totale P_o, ce rezultă ca sumă a tuturor pierderilor ce intervin în funcționarea aparatului de comutație. In Tab.7.12 sunt indicate și valorile energiei disipate de arcul electric de comutație în procesul de deconectare W_a ca și raportul dintre costul energiei electrice C_{el} și costul total al contactorului, C_o, la curent de funcționare 1,8 I_n, regim AC4, cu durată relativă de conectare 40%, P_T [W], reprezintă pierderile de putere pe tiristoarele schemei cu comutație statică.

Tab.7.12

Parametru	I_n=160 A	I_n=250 A	I_n=400 A	I_n=600 A	Tip de comutație
W_a [kWh]	0,45	0,7	1,12	1,75	C
P_k [W]	45	70	120	100	C

Tab.7.12 (continuare)

P_b [W]	17	27	40	70	C
P_a [W]	270	420	670	1050	C
P_o [W]	332	517	830	1301	C
C_{el}/C_o	4,72	3,18	3,73	4,95	C
P_k [W]	35	52	85	150	H
P_b [W]	17	27	40	71	H
P_c [W]	30	30	30	30	H
P_o [W]	82	109	155	251	H
P_T [W]	400	630	1000	-	S
P_c [W]	50	50	50	-	S
P_o [W]	450	680	1050	-	S

Considerând ca referință contactorul cu comutație hibridă, Tab.7.13 subliniază încă mai concludent avantaje ale acestui tip de comutație, prezentând raportul dintre pierderile totale și pierderile pentru varianta cu comutație hibridă, pentru diferite valori ale curentului nominal.

Tab.7.13

Tip comutație	I_n=160 A	I_n=250 A	I_n=400 A	I_n=630 A
C	4	4,75	5,35	5,18
H	1	1	1	1
S	5,5	6,25	6,8	-

Se impun subliniate desigur dezavantajele legate de costurile de revizie și repunere în funcțiune pentru aparatele cu comutație hibridă, în plus, pentru asemenea realizări tehnice ponderea revenind lucrărilor ce necesită personal calificat.

Semnalăm și riscul distrugerii tiristoarelor datorită autodeschiderii contactelor în cazul comutației hibride, acestea acceptând totuși valori de $30I_n$ pentru durata de 1 s, în timp ce în cazul comutației statice poate fi suportat curentul de doar $10I_n$ pentru durata de 1 s și respectiv $30I_n$ pentru durata de 0,01 s.

Din punct de vedere al compatibilităţii electromagnetice se semnalează existenţa unor semnale perturbatoare de frecvenţă 300 Hz în cazul comutaţiei statice, care nu se manifestă la comutaţia hibridă sau la comutaţia cu contacte. Comutaţia hibridă este chiar preferată în aparatura radio şi electronică datorită nivelului redus al perturbaţiilor de funcţionare.

Cercetările în domeniul echipamentelor de comutaţie de joasă tensiune continuă cu bune rezultate şi în prezent [4], [19], [30], punând la dispoziţia constructorilor elemente de protecţie specializate, capabile să furnizeze semnale de comandă-protecţie eficiente, ce anticipează eventual valorile periculoase ale curentului din circuit şi folosesc deplin posibilităţile de comutaţie ultrarapidă ale elementelor semiconductoare utilizate. Se anunţă chiar o schimbare a concepţiei clasice de realizare a protecţiei consumatorilor alimentaţi de aparatele electrice de comutaţie, propunându-se identificarea informaţiilor utile pentru realizarea protecţiei eficiente şi nu adăugarea unor elemente specializate independente pentru diferitele situaţii de defect posibile.

Bibiografie

1. Aleksandrov G. N., ş.a., Teoriia elektriceskih apparatov. Moskva, Vîsşaia Şkola, 1985.
2. Bätz H., Rutzen S., Elektrotechnische SchaltgeräteVEB. Verlag Technik Berlin, 1986.
3. Ciunihin A. A., Elektriceskie apparatî. Energoatomizdat, Moskva, 1988.
4. Clerc G., Rojat G., Phuoc V.T.Nguyen, Protection numérique contre les surintensités dans l'appareillage statique, RGE, 6, (1992).
5. Despiney Philippe, La surveillance des réducteurs de mesure, RGE, 4, (1995).
6. Dicany S. V., Namitokov K. K., Apparatî sistem bespereboynogo elektrosnabjeniia. Izd. Tehnika, Kiev, 1989
7. Flurscheim C.H., Teoriia i konstrukţiia vîkliuciatelei. Energoizdat, Leningrad, 1982 (trad. din lb. engleză).

8. Gartmair H., Ein Modell für das Verhalten eines Vakuumschalters vor dem Stromnulldurchgang. Dissertation, Technische Universität München, 1989.
9. Gisselmann M., Kurzzeitoptische Untersuchungen der Entladungsentwicklung, in N_2 und SF_6 an modellanordnungen bei Gleichund Impulsspannung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1986.
10. Greitzke S., Untersuchungen an Hybridschaltern. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1989.
11. Hnatiuc E., Baraboi A., Leonte P., Furnică Em., Adam M., Stadiul actual și perspective în realizarea aparatelor de comutație de joasă tensiune, Al III-lea simpozion "Optimizarea dezvoltării și exploatării instalațiilor energetice", Iași, Facultatea de Electrotehnică (1991).
12. Hnatiuc E., Leonte P., Modern Aspects on Construction of Electrical Apparatus, Conferința Internațională OPTIM '94, Brașov (1994).
13. Hnatiuc E., Leonte P., Popa Coculeana, Iacob C., Hnatiuc B., Techniques modernes dans la commutation de puissance à basse tension, Sesiunea jubiliară "85 de ani de învățământ electrotehnic la Iași" (1995).
14. Hortopan G., Aparate electrice. EDP, București, 1980.
15. Hortopan G., Trușcă V., Pavelescu D., Șerbănescu M., Nițu Smaranda, Aparate electrice de comutație. Tehnica fenomenelor rapide. Editura Tehnică, București, 1985.
16. Kussy F. W., Warren J. L., Design Fundamentals for Low-Voltage Distribution and Control. Marcel Dekker Inc., New York and Basel (1987).
17. Lasota R., Reduction of Switching Arc Energy in Direct Current Hybrid Switces with GTO Thyristors, Seventh International Conference "Switching Arc Phemomena", Lodz, Poland, (1993).
18. Leonte P., Hnatiuc E., Baraboi A., Aparate electrice. Lucrări de laborator (ingineri). I.P.Iași, 1973.

19. Matlac I., Convertoare electrice, Universitatea Braşov, 1983.
20. Moghilevskiy G. V., Raynin V. E., Grebennik V. I., Poluprovodnikovîie apparatî zaşcitî, Izd. Energhiia, Moskva, 1980.
21. Moghilevskii G. V., Ghibridnîe elektriceskie apparatî nizkogo napriajeniia. Eloektroatomizdat, Moskva, 1986.
22. Morant M., Legros W., Comportement du disjoncteur à vide dans les réseaux moyenne tension, RGE, 3, 36 (1995).
23. Morel R., Disjoncteurs limiteurs et sélectifs, RGE. 11, (1994).
24. Namitokov K. K., Ilyna N. A., Skolovskiy I. G., Apparatî dlia zaşcitî poluprovodnikovîh ustroistv. Energoatomizdat, Moskva, 1988.
25. Rombaut C., Seguier G., Bausiere R., Power Electronic Converters. McGraw-Hill Book Company, 1987
26. Sporea D., Gălăţeanu Bîrcă Ş., Circuite optoelectronice, Editura Militară, Bucureşti, 1986.
27. Taev I. S., Elektriceskie apparatî, Izd. Energhiia, Moskva, 1977.
28. Taev I. S., Osnovî teorii elektriceskih apparatov, Izd. Vîsşaia Skola, Moskva, 1987.
29. Waitschat H., Verfahren zur Beurteilung des Betriebzustandes von Metalloxid-Varistoren. Dissertation, Universität von Hannover, 1989.
30. Yousfi A., Contacteur triphasé avec programmation de phase d'enclanchement et temps d'ouverture, RGE., 2 (1995).

ANEXE

Intrerupătoare de înaltă tensiune cu hexafluorură de sulf fabricate în România

Tip / Caracteristica	H07	H14	H17	H42
Tensiunea nominală [kV]	72,5	145	170	420
Curent nominal [A]	2500 (3150)*	2500 (3150)*	2500 (3150)*	2500 (3150)*
Frecvenţa nominală [Hz]	50 (60)*	50 (60)*	50 (60)*	50 (60)*
Curent de rupere nominal [kA]	40	40	40	40
Tipul acţionării	hidraulică	hidraulică	hidraulică	hidraulică
Secvenţa nominală	D-0,3"-ID-3'-ID	D-0,3"-ID-3'-ID	D-0,3"-ID-3'-ID	D-0,3"-ID-3'-ID
Tensiuni de comandă [V]	48; 110; 220	48; 110; 220	48; 110; 220	48; 110; 220
Tensiunea auxiliară [V]	380/220	380/220	380/220	380/220

* Se fabrică în condiţii speciale, cu consultarea proiectantului.

Intrerupătoare de medie tensiune cu hexafluorură de sulf fabricate în România

Tip Caracteristica	HF 12N	HF 24N	HF 12P
Tensiunea nominală [kV]	12	12	12
Curent nominal [A]	1250	1250	1250
Frecvenţa nominală [Hz]	50	50	50
Tensiune de ţinere la frecvenţă industrială [kV]	35	55	35
Tensiunea de ţinere la unda de impuls 1,2/50 μs [kVmax]	75	125	75
Capacitatea de rupere la scurtcircuit [kA]	25	16/20	31,5
Curentul limită termic la 1" [kA]	31,5	25	40
Curentul limită dinamic [kAmax]	80	63	100

30h

Celule electrice închise de interior echipate cu întrerupătoare cu hexafluorură de sulf realizate în România

Tip Caracteristici tehnice	CIP-M-SF6-24 kV		CII-1GC (SF6)-12	CII-A-SF6-2-12B
Tipul întrerupătorului	HF-24M	SFset	FG2	
Tensiunea nominală [kV]	24	24	12	7,2; 12
Curent nominal [A]	630	630	2500	630; 1250 2500; 3150
Curent de rupere [kA]	16	12,5	31,5; 40	40 (31,5)
Stabilitatea termică 1" [kA]	10	10	40; 5*	40 (31,5)
Stabilitatea dinamică [kAmax]	25	25	100; 12*	100
Tensiunea de ţinere la 50Hz; 1 min [kV]	55	55	28; 20*	20; 28
Tensiunea de ţinere la impuls 1,2/50 µs [kVmax]	125	125	75; 60*	60; 75
Grad de protecţie	IP-3X	IP-3X	IP-54	IP-3X

* - valorile sunt pentru celula cu contactoare şi siguranţe